

MASTERTHESIS
ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES DES
MASTER OF ENGINEERING

vorgelegt von
Christian Williges
geboren am 11.02.1981 in Magdeburg

Ernst-Abbe Fachhochschule Jena, Fachbereich SciTec
Studiengang Laser- und Optotechnologien
Matrikelnummer: 630 111

17. März 2014

AUFBAU EINES AUTOMATISCHEN
REFOKUSSIERUNGSSYSTEMS
FÜR HOCHAUFLÖSENDE SATELLITENKAMERAS

Mentor: Prof. Dr. rer. nat. Ralf Reulke (DLR, Berlin)

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Burkhard Fleck (EAH, Jena)

„SPACE ISN'T REMOTE AT ALL.
IT'S ONLY AN HOUR'S DRIVE AWAY IF YOUR CAR
COULD GO STRAIGHT UPWARDS.”

Sir Fred Hoyle

„THINGS ARE ONLY IMPOSSIBLE UNTIL THEY'RE NOT.“

Jean-Luc Picard

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	I
1 MOTIVATION.....	1
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 Notwendigkeit der Refokussierung.....	4
2.2 Verschiedene Möglichkeiten der Refokussierung.....	7
2.2.1 Aktive und Passive Refokussierungssysteme.....	7
2.2.2 Passive Systeme – Methoden zur Defokusbestimmung.....	8
2.3 Kreuzkorrelation als Auswertungsverfahren.....	10
2.4 Stand der Technik.....	11
2.5 Ansatz für ein Refokussierungssystem	14
3 KONZIPIERUNG DES VERSUCHSAUFBAUS – PROJEKTPLANUNG UND UMSETZUNG	18
3.1 Anpassung des vorgegebenen Optikdesigns	19
3.1.1 Erhöhung der mechanischen Stabilität.....	20
3.1.2 Vereinfachung des Strahlenganges.....	20
3.2 Konstruktives Design des Versuchsaufbaus.....	22
3.2.1 Anforderungsliste.....	22
3.2.2 Unterteilung der Hauptfunktionen in Teil- und Unterfunktionen	27
3.2.2.1 Aufnahme und Positionierung verschiedener Objektive/ Teleskope	27
3.2.2.2 Positionierung und Führung aller optischen Elemente der Detektoreinheit.....	28
3.2.2.3 Ausrichtung und Refokussierung der Detektoreinheit.....	31
3.2.3 Morphologische Analyse	32
3.2.4 Versuchsaufbau	34
3.3 Konzipierung des elektronischen Designs.....	36
4 EXPERIMENTE	38
4.1 Bestimmung der Ausgleichsgeraden.....	39
4.1.1 Abhängigkeit der <i>Pixelshiftbestimmung per Kreuzkorrelation</i> von der Bewegungsrichtung des Manipulators.....	40
4.1.1.1 Ausschnittvergrößerung.....	42
4.1.2 Betrachtung der Mittelwerte und Standardabweichung aus Vor- und Zurückbewegung des Manipulators.....	44
4.1.3 Vergleich der Standardabweichungen aller drei <i>Targets</i>	46
4.1.3.1 Ausschnittvergrößerung.....	46
4.1.4 Vergleich der Mittelwerte aller drei <i>Targets</i>	47
4.1.4.1 Ausschnittvergrößerung.....	48
4.1.5 Bestimmung der <i>Target</i> -abhängigen Ausgleichsgeraden (einteilige AG).....	48
4.1.5.1 Bestimmung der <i>Target</i> -abhängigen Ausgleichsgeraden (zweigeteilte AG).....	50

4.2 De- und Refokussierungsexperimente	52
4.2.1 Defokussierung per Kollimator mit äquidistanter Schrittweite	52
4.2.1.1 De- und Refokussierung mit Siemensstern	54
4.2.1.2 De- und Refokussierung mit Dia	55
4.2.1.3 Vergleich der Standardabweichungen	56
4.2.2 Defokussierung per Kollimator mit zufälliger Schrittweite	57
4.2.2.1 De- und Refokussierung mit Siemensstern	58
4.2.2.2 De- und Refokussierung mit <i>Target</i> Dia	60
4.2.2.3 Vergleich der Standardabweichungen	61
4.3 Zusammenfassung	63
5 AUSWERTUNG.....	64
5.1 Problematik stochastisch verteilter Motivmuster	64
5.1.1 Schwierigkeiten bei realen Szenen	66
5.2 Auswertung der Experimente zur Bestimmung der Ausgleichsgeraden.....	66
5.2.1 Simulation der Ausgleichsgeraden mit <i>Zemax</i>	66
5.2.2 Berechnung einer nichtlinearen Ausgleichsgerade	67
5.2.2.1 Bestimmung des Gesamtsystems aus Einzellinse und Fujinon-Objektiv	70
5.2.2.2 Ermittlung des bildseitigen Zerstreuungskreises über den Abbildungsmaßstab β'	72
5.2.2.3 Ermittlung des Zerstreuungskreises über die Newton'sche Abbildungsgleichung	74
5.3 Diskussion der Versuchsergebnisse der De- und Refokussierung	75
5.3.1 Abweichung der Refokusposition von der Idealposition	75
5.3.2 Unterschiede zwischen den verschiedenen <i>Targets</i>	76
5.3.3 Siemensstern als <i>Target</i>	77
5.4 Fazit	77
6 ZUSAMMENFASSUNG.....	78
7 AUSBLICK	79
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VII
LITERATURVERZEICHNIS.....	VIII
DANKSAGUNG	X
ERKLÄRUNG DER SELBSTSTÄNDIGKEIT	XII

1 Motivation

Die ersten Luftbildaufnahmen wurden von dem Franzosen Gaspard-Felix Tournachon im Jahre 1858 aus einem Ballon heraus aufgenommen¹. Während Ballons allerdings nur eingeschränkte Möglichkeiten der gezielten Navigation bieten, eröffneten sich mit der Entwicklung der motorisierten Luftfahrt zu Beginn des 20. Jahrhunderts vielfältige Möglichkeiten der luftgestützten Erdbeobachtung, anfänglich im militärischen und naturwissenschaftlichen, später auch im privaten Bereich, wie *Google Earth* heute zeigt.

Im Oktober des Jahres 1946 entstanden die ersten Bilder der Erde aus dem Weltraum, aufgenommen von einer 35 mm Filmkamera an Bord einer umgebauten V2 Rakete². Von diesen anfangs sehr körnigen schwarz/weiß-Aufnahmen ging die Entwicklung der Erdbeobachtung in den letzten knapp 60 Jahren hin zu immer höherauflösenden Systemen, die nicht nur den VIS-Bereich, sondern einen Großteil des elektro-magnetischen Spektrums abdecken.

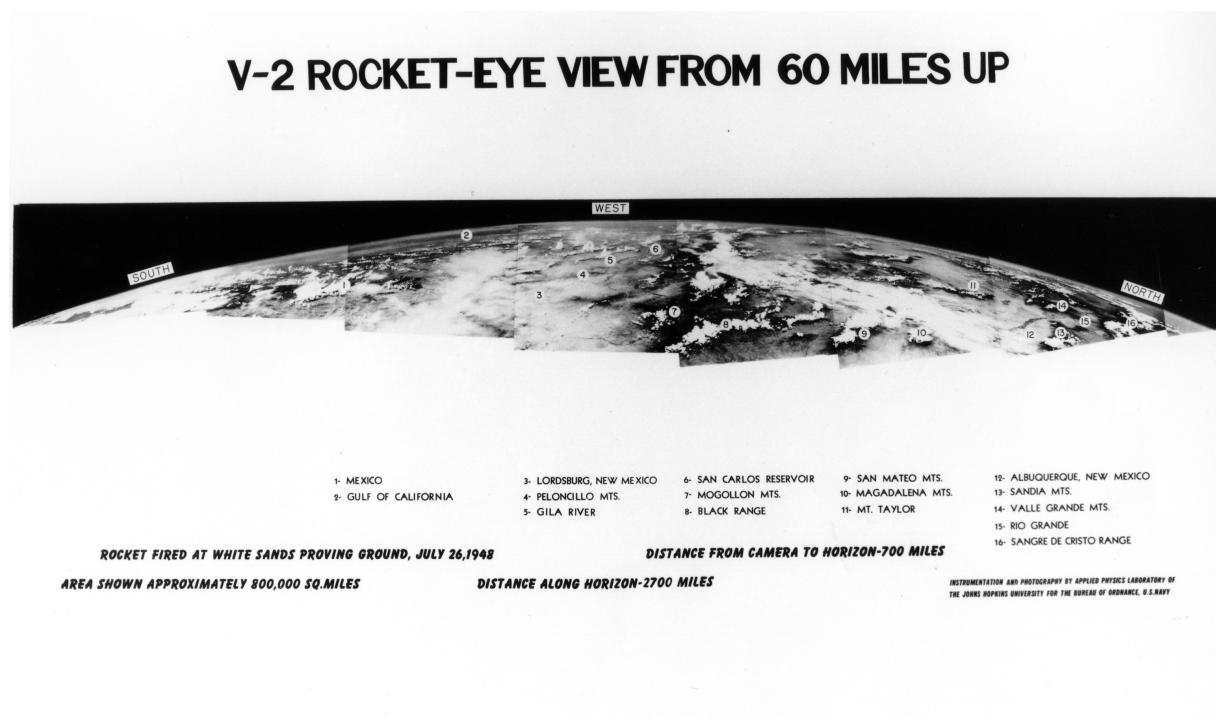


Abbildung 1 | Eine der ersten Aufnahmen der Erde aus dem Weltraum².

Die ersten satellitengestützten Kamerasysteme der 1960er Jahre waren noch stark auflösungsbegrenzt, was sich jedoch rasch änderte – schon 1967 wurden im Rahmen des *CORONA*-Programms Bilder mit einer Bodenauflösung (engl. *ground sampling distance*, GSD) von 5 ft ($\approx 1,5$ m) mit dem *KH-4* Satelliten aufgenommen³. Momentan ist *GeoEye-2* in Planung, ein kommerzieller Satellit mit einer vorgesehenen GSD von 0,34 m ⁴.

Die herkömmlichen, niedrigauflösenden Satellitenkameras waren bisher mit einer Optik ausgestattet, die nur ein einmaliges Fokussieren auf den Arbeitsabstand zuließ, eine Refokussierung war nicht vorgesehen. Die aktuelle Entwicklung hochauflösender Satellitenkameras macht allerdings einen Refokussierungsmechanismus notwendig, da die Schärfentiefe der Systeme mit zunehmender Brennweite immer weiter abnimmt und somit bei unterschiedlichen Gegenstandsweiten zwischen Erde und Satellit ein unscharfes Bild entsteht. Solche unterschiedlichen Abstände können auch trotz fester Umlaufbahn entstehen, wenn der Satellit ausschwenkt, oder nacheinander hohe Berge und tiefe Täler beobachtet werden.

Bisherige Refokussierungssysteme für Satelliten arbeiten nach dem Prinzip des Vergleichs zweier Bilder, die bei aufeinanderfolgenden Überflügen über die selbe Stelle aufgenommen werden. Hierbei kann z. B. der Kontrast der Bilder bestimmt werden; die Optik wird nach einer bestimmten Anzahl Messungen so justiert, dass die Bilder den größtmöglichen Kontrast liefern. Dieses Verfahren ist akkurat, dauert allerdings entsprechend lange, weshalb es sich nicht für schnell veränderliche Szenen, wie z. B. dem Ausschwenken des Satelliten eignet⁵.

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines autonomen, mechanischen Refokussierungssystems (engl. *Autonomous Refocus Mechanical System, ARMES*) auf Basis der Phasenvergleichsmethode (engl. *phase difference, PD*). Dieses System soll Grundlage für eine Satellitenoptik sein, mit der eine rasche Refokussierung möglich ist.

Die Gesamtarbeit ist aufgrund des Umfangs in zwei Abschlussarbeiten unterteilt:

- In der Vorliegenden werden
 - die Grundlagen erläutert und der Stand der Technik ermittelt,
 - das Projekt in seinen Teilbereichen Optik, Mechanik und Informatik geplant,
 - der Versuch aufgebaut und durchgeführt,
 - sowie die Ergebnisse analysiert.
- In der Bachelorarbeit von Gustav Malte Müller-Rowold (Humboldt Universität zu Berlin) „*Signal- und Bildverarbeitungssystem zur automatischen Refokussierung von optoelektronischen Sensoren*“⁶ wird der Informatikhintergrund (Programmierung, Bildverarbeitung und Ansteuerung der elektronischen Komponenten) erläutert.

2 Grundlagen

Im ersten Teil des Kapitels werden die Gründe für die Notwendigkeit einer Refokussierung dargestellt. Sämtliche Berechnungen die hierfür nötig sind, werden exemplarisch für das *GeoEye-2*-System (vgl. Tabelle 1)⁷ durchgeführt, gelten aber auch für andere Kamerasysteme.

Tabelle 1 | Spezifikationen des optischen Systems für *GeoEye-2*.

	GSD in m	Pixelgröße in m	Orbit in m	f in m	f#	D in m	Wellenlänge in m
<i>GeoEye-2</i> Orbit 1	0,25	8,00E-06	500E+3	16	14,6	1,1	650E-09
<i>GeoEye-2</i> Orbit 2	0,34	8,00E-06	681E+3	16	14,6	1,1	650E-09

Mit GSD: Bodenauflösung (engl: ground sampling distance), f: Brennweite, f#: Blendenzahl, D: Durchmesser Hauptspiegel

Im Anschluss werden verschiedene Messverfahren zur Defokusbestimmung beschrieben und evaluiert, die Kreuzkorrelation als Auswertverfahren erläutert und der Stand der Technik angeführt. Ein erster Versuchsaufbau, der Grundlage für diese Arbeit war, wird ebenfalls vorgestellt.

2.1 Notwendigkeit der Refokussierung

Wie in der Motivation erwähnt, ist die veränderliche Bildweite beispielsweise bei ausschwenkendem Satelliten (vgl. Abbildung 2) nicht mehr durch die Schärfentiefe des optischen Systems kompensierbar, was durch die folgende Berechnung nachgewiesen wird.

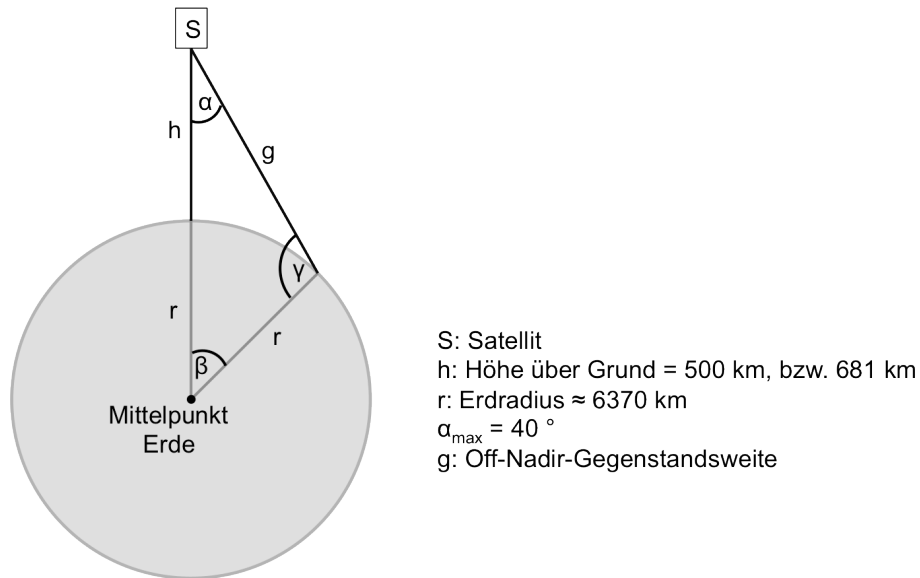


Abbildung 2 | Schematische Darstellung der Änderung der Gegenstandsweite bei Ausschwenken des Satelliten.

Mit Hilfe des Sinussatzes wird im Folgenden exemplarisch für eine Flughöhe von 500 km die Veränderung der Gegenstandsweite berechnet.

$$\gamma = \arcsin \left[\frac{(r + h) \cdot \sin \alpha_{\max}}{r} \right] = \arcsin \left[\frac{(6370 + 500) \text{ km} \cdot \sin 40^\circ}{6370 \text{ km}} \right] \approx 136^\circ$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha - \gamma \approx 3,9^\circ \quad (1)$$

$$g = \frac{\sin \beta \cdot r}{\sin \alpha} = \frac{\sin 96,11^\circ \cdot 6370 \text{ km}}{\sin 40^\circ} \approx 672 \text{ km}$$

Somit beträgt die Differenz der Gegenstandsweite zwischen Nadir und maximaler Off-Nadir-Auslenkung $\alpha_{\max} = 40^\circ$ bei einer Flughöhe von 500 km rund 172 km. Für Winkel von $\alpha = 0^\circ \dots 40^\circ$ und die relevanten Flughöhen $h=500$ km, 681 km ist die Änderung der Gegenstandsweite in Abbildung 3 dargestellt:

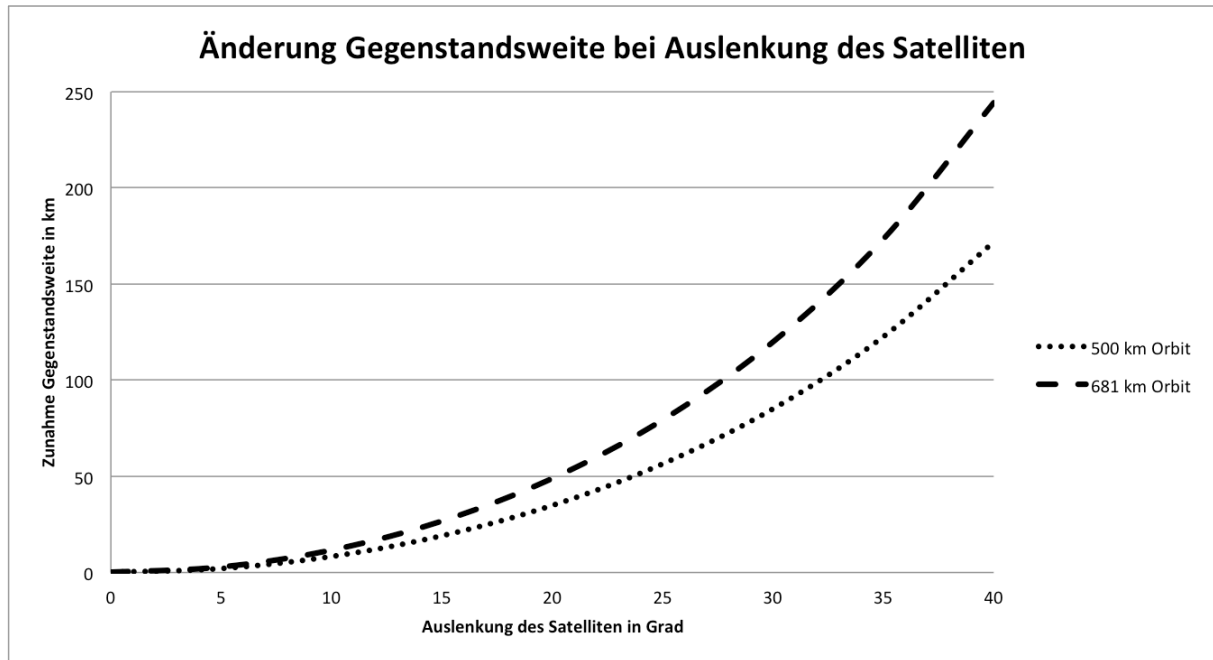


Abbildung 3| Grafische Darstellung der Änderung der Gegenstandsweite bei Ausschwenken des Satelliten von 0° ... 40° bei den beiden geplanten Flughöhen.

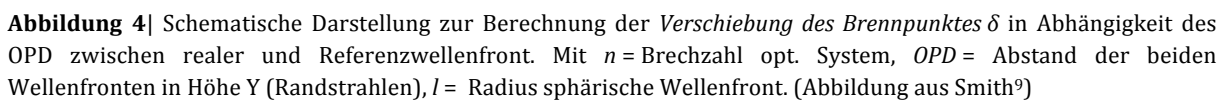
Mit der Information über die Veränderung der Gegenstandsweite lässt sich über die Beziehung

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad (2)$$

näherungsweise auch die Veränderung der Bildweite bestimmen (vgl. Abbildung 5). Hierbei ist a die Gegenstandsweite, a' die Bildweite und f' die Brennweite des Systems. In Abbildung 4 ist die relative Änderung der Bildweite im Vergleich zur tolerierbaren Unschärfe aufgetragen. Diese kann auf unterschiedliche Weise aus der Wellenfrontdeformation eines defokussierten Systems berechnet werden. Einen Ansatz bietet hierbei das Rayleigh'sche $\lambda/4$ -Kriterium. Dieses besagt, dass die Abbildung nicht wesentlich beeinträchtigt wird, sofern die Wellenfrontabweichung geringer als eine Viertel Wellenlänge von einer sphärischen Referenzwelle abweicht⁸. Nach Warren J. Smith⁹ kann aus dieser Annahme die sich ergebende Verschiebung des bildseitigen Brennpunktes ermittelt werden (vgl. Abbildung 4). Diese Defokussierung wird aus der optischen Weglängenänderung (engl. *optical path difference*, OPD) zwischen einer realen, das optische System verlassenden und einer idealen Referenzwelle berechnet:

$$\delta = \pm \frac{\lambda}{2n \sin^2 U_m} = 2\lambda \cdot (f\#)^2 \quad (3)$$

mit λ = Wellenlänge, $f\#$ = Blendenzahl, Rest s. Bildunterschrift Abbildung 4.



Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass bei einer geforderten Genauigkeit zwischen $\lambda/8$ bis $\lambda/16$ der bildseitige Schärfentiefebereich der Geo-Eye-2-Optik beim Ausschwenken des Satelliten verlassen wird und somit eine Refokussierung notwendig ist. Die Darstellung zeigt die relative Änderung der Bildweite bei Ausschwenken des Satelliten von $0^\circ \dots 40^\circ$ bei den geplanten Flughöhen von 500 km und 681 km. Zusätzlich veranschaulicht die violette Kurve die aufsummierte und somit maximale Bildweitenänderung, wenn der Satellit seinen Orbit ändert und gleichzeitig ausschwenkt.

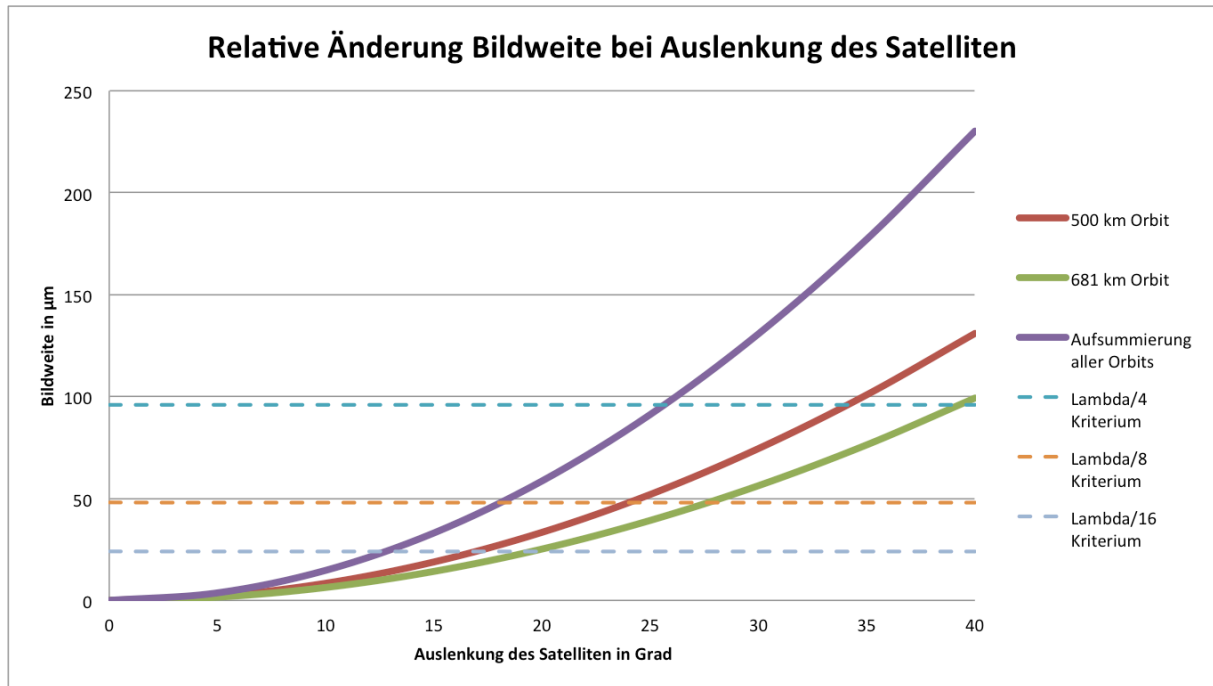


Abbildung 5| Grafische Darstellung der relativen Änderung der Bildweite bei Ausschwenken des Satelliten. Die gestrichelten Linien verdeutlichen die Grenzen der Schärfentiefe bei verschiedenen (λ/x) -Kriterien.

2.2 Verschiedene Möglichkeiten der Refokussierung

2.2.1 Aktive und Passive Refokussierungssysteme

Refokussierungssysteme werden zurzeit hauptsächlich in der Fotografie eingesetzt. Möglichkeiten zur Bestimmung der Defokussierung sind grundsätzlich in zwei Kategorien aufzuteilen: *aktiv* und *passiv*. Die aktiven Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein Signal aussenden (z. B. IR-Licht, Ultraschall) und über verschiedene Auswertsysteme, wie z. B. Laufzeitmessung, oder Triangulation die Entfernung zwischen Kamera und Gegenstand bestimmen¹¹. Dies kann bei größeren Distanzen zu Schwierigkeiten aufgrund einer zu geringen Signalstärke führen.

Passive Systeme nutzen das vorhandene Umgebungslicht, um die Gegenstandsweite zu bestimmen¹². Hierbei kann mangelnde Helligkeit problematisch sein, was aber durch zusätzliches Licht (z. B. integrierter Blitz) ausgeglichen werden kann.

2.2.2 Passive Systeme – Methoden zur Defokusbestimmung

Kontrastermittlung (engl: *contrast detection, CD*) und Phasenvergleich (engl: *phase detection, PD*) sind die beiden häufigsten Methoden zur Bestimmung der Schärfe eines Motivs.

Bei ersterer überfährt die Optik in einer immer kleiner werdenden Schleife den Punkt des größten Bildkontrastes auf dem Detektor, bis dieser eindeutig bestimmt ist (vgl. Abbildung 6). Für dieses Verfahren werden bei Nutzung elektronischer Bildaufnahmeelemente (z. B. CCD oder CMOS) keine weiteren optischen Bauteile benötigt, da der Kontrast direkt mit Hilfe des bildaufnehmenden Sensors ermittelt werden kann. Nachteilig ist die geringe Geschwindigkeit, da der Punkt der größten Schärfe im Allgemeinen öfter überfahren werden muss. Hierfür müssen mehrere Bilder aufgenommen, deren Kontrast miteinander verglichen und der relativ höchste Kontrast ermittelt werden, was zu Lasten der Energieversorgung geht¹³.

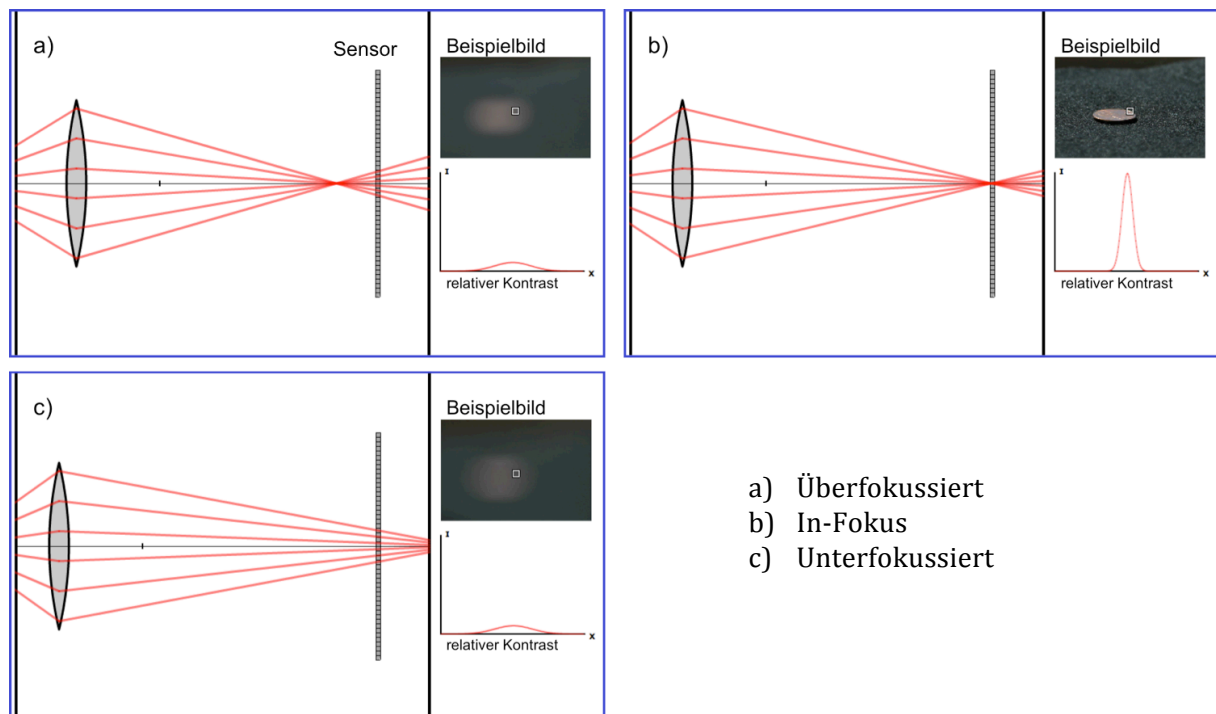
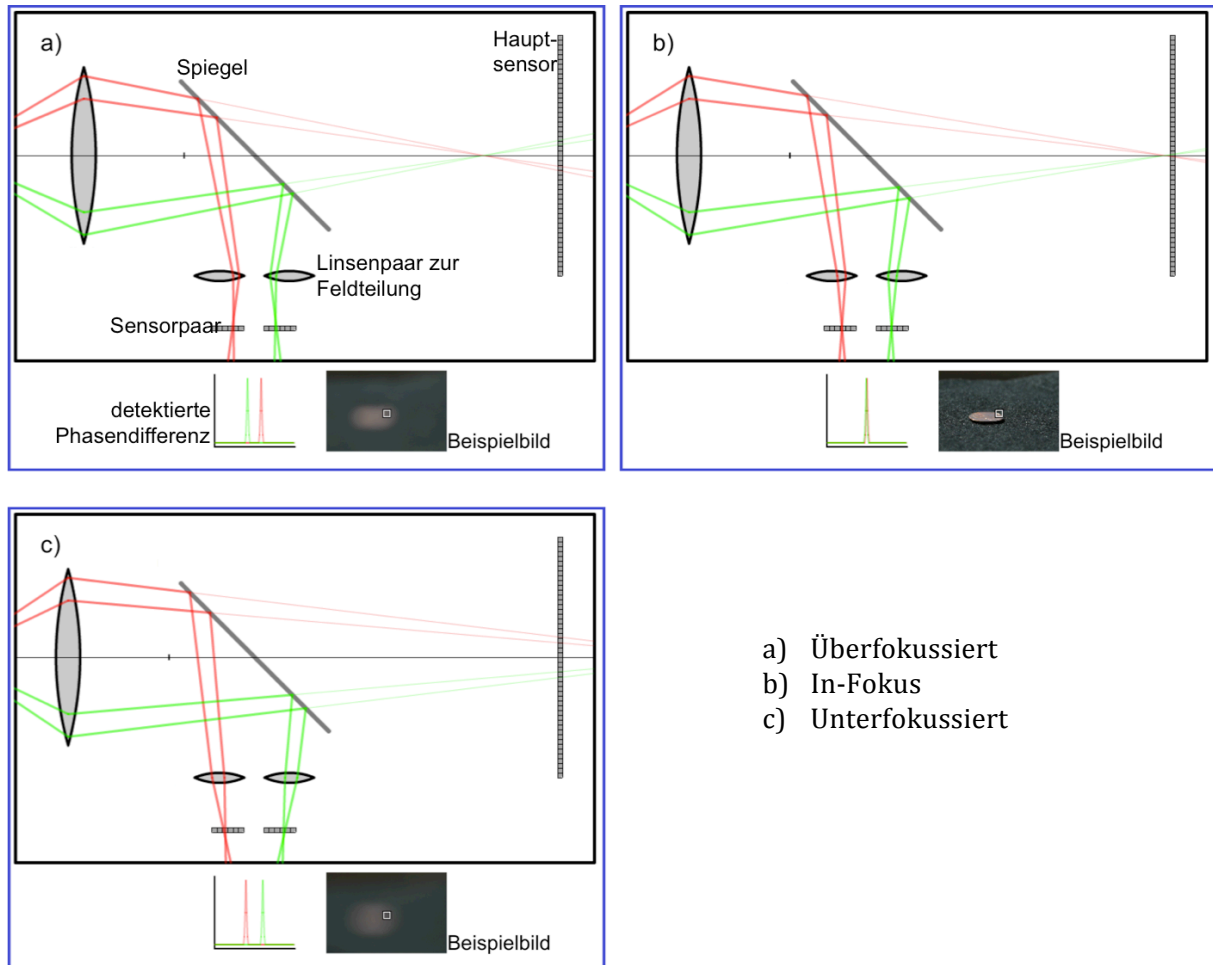


Abbildung 6 | Schematische Darstellung der Kontrastermittlungsfunktion zur Bestimmung der Schärfe eines Motivs. Der Kontrast ist am größten, wenn die Linsen sich in einer Position befinden, in der das Motiv scharf auf der Bildebene abgebildet wird [b]]. Um diese Position zu bestimmen, muss das Linsensystem die Position mindestens einmal (aber i.d.R. öfter) überfahren um den Kontrastabfall/ -anstieg und den Punkt des relativ höchsten Kontrastes eindeutig bestimmen zu können (Abbildung aus Willet¹³).

Bei der zweiten Methode wird der bildseitige Abbildungsstrahlengang (oder ein Teil dessen) einer Feldteilung unterzogen. Diese Teilung kann z. B. durch Linsen im Strahlengang (vgl. Abbildung 7), durch Prismenspiegel, oder Ähnliches erfolgen (vgl. Abbildung 13). Die Detektion erfolgt mittels elektronischer Sensoren (CCD, CMOS), welche sich bei gängigen Spiegelreflexkameras in einer zur Bildebene (Hauptsensor) konjugierten Ebene befinden¹⁴.

Die so erzeugten Teilbilder können mit Hilfe von Bildauswertungsverfahren wie z. B. der Kreuzkorrelation verglichen werden. Im Falle einer korrekten Fokussierung sind beide Bilder gleich, bei Defokussierung sind die beiden Bilder gegeneinander verschoben. Diese Verschiebung der Bilder wird auf den Empfängern detektiert, wobei sie von zwei Parametern abhängig ist: Stärke der gegenstandsseitigen Defokussierung sowie Position des zu fokussierenden Gegenstandes – vor oder hinter der aktuell fokussierten Gegenstandsebene des Systems (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8).



- a) Überfokussiert
- b) In-Fokus
- c) Unterfokussiert

Abbildung 7 | Schematische Darstellung des Phasendifferenzautofokus (PD-AF). Die relative Position der beiden Teilbilder (s. kleines Diagramm „detektierte Phasendifferenz“) ist abhängig davon, ob das Motiv über-, oder unterfokussiert ist. Aus der Positionierung der beiden Teilbilder zueinander ist ersichtlich, in welche Richtung eine Linsenbewegung erfolgen muss, um zu refokussieren. Aus dem Abstand der beiden Teilbilder kann ermittelt werden, wie weit das Linsensystem bewegt werden muss, da sich der Abstand vergrößert, je stärker die Gegenstandsebene defokussiert ist (Abbildung aus Willet¹²).

Aus der Richtung des Versatzes kann somit direkt ermittelt werden, in welche Richtung das optische System bewegt werden muss, um die angestrebte Gegenstandsebene zu fokussieren. Aus dem Betrag des Versatzes der beiden Teilbilder kann die Entfernung von der aktuellen

fokussierten Gegenstandsebene zur angestrebten errechnet werden, sodass in einem Schritt exakt fokussiert werden kann.

Aus der beschriebenen Funktionsweise ergeben sich neben der reinen Refokussierung weitere Anwendungsmöglichkeiten, wie die Distanzmessung, welche z. B. für Rendezvous-, Lande- und Andock-Manöver genutzt werden kann. Auch das *Tracking*, also das Verfolgen eines bestimmten Objektes im Motiv, ist auf Grundlage eines solchen Systems möglich¹².

Die Phasendetektion bietet im Vergleich zur Kontrastdetektion verschiedene Vorteile. Der Maßgebendste stellt der Geschwindigkeitszuwachs dar, da der Punkt der größten Schärfe nicht mehrmals überfahren werden muss. Zusätzlich ist – bei bestimmter Anordnung der eingebauten Sensoren – eine kontinuierliche Nachführung der Schärfe möglich, was neben der Aufnahme von Einzelbildern auch Serienbild-, bzw. Filmaufnahmen ermöglicht. Allerdings sind zusätzliche optische Bauteile nötig, die das Gesamtsystem vergrößern und die dafür nötige Justierung fehleranfälliger macht.

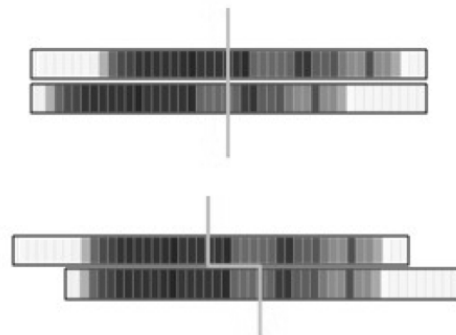


Abbildung 8| Schematische Darstellung des Phasenvergleichs der beiden Teilbilder. Im oberen Bild ist zwar das gleiche Muster wie im unteren zu sehen, dieses überlagert sich allerdings nicht; das Motiv ist defokussiert. Aus Richtung und Stärke der Verschiebung der beiden Bilder zueinander kann die nötige Linsenbewegung zur Refokussierung berechnet werden (Abbildung aus Puchner¹⁵).

2.3 Kreuzkorrelation als Auswertungsverfahren

Die Kreuzkorrelation (engl. *cross correlation function*, CCF) ist ein Werkzeug zur Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Signale und deren zeitlicher oder örtlicher Abweichungen voneinander. Bei der hier verwendeten Art der Bildverarbeitung wird sich immer auf eine örtliche Abweichung bezogen, da die beiden Bilder bei Defokussierung eine Verschiebung zueinander erfahren (vgl. Abbildung 9). In der analytischen Darstellung werden die beiden Bilder als $f_1(x,y)$ und die verschobenen Bilder als $f_2(x+u,y+v)$ dargestellt, wobei x und y spezifische Bildkoordinaten und u und v die jeweilige Verschiebung sind. Da das Signal nicht als kontinuierliche mathematische Funktion, sondern in Form diskreter Werte vorliegt, wird die

Summendarstellung gewählt. Um ein normiertes Ergebnis (engl. *normalized cross correlation function*, NCCF) zu erhalten, wird diese Summe durch den Effektivwert der einzelnen Signale geteilt:

$$NCCF(u, v) = \frac{\sum_{(x,y)} f_1(x, y) \cdot f_2(x + u, y + v)}{\sqrt{\sum_{(x,y)} f_1(x, y)^2} \cdot \sqrt{\sum_{(x,y)} f_2(x + u, y + v)^2}} \quad (4)$$

Das Ergebnis liefert einen Wert, dessen Amplitude zwischen 1 und -1 liegt und der die Verschiebung beider Bilder in Subpixelgenauigkeit angibt. Diese Verschiebung im Bildraum lässt bei bekanntem optischem System das Zurückrechnen auf die Verschiebung im Gegenstandsraum zu. Bei nicht näher bekanntem optischem System kann diese Verschiebung auch experimentell ermittelt werden. Eine genauere Erläuterung der verwendeten Bildverarbeitungsverfahren findet sich in der Bachelorarbeit von Gustav Malte Müller-Rowohlt⁶.

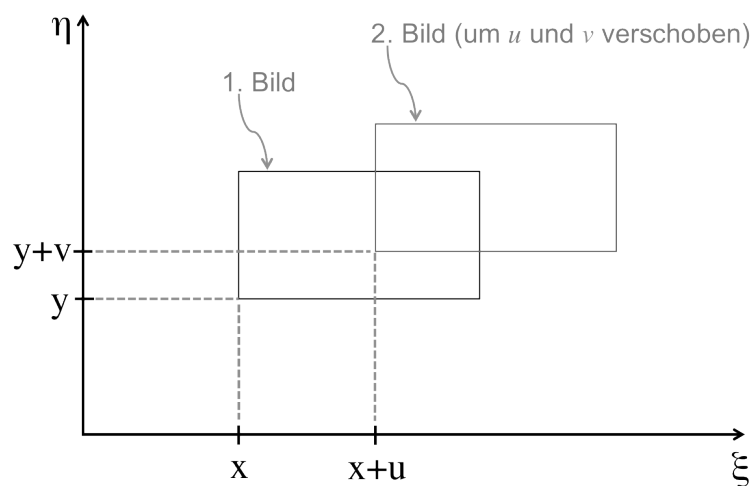


Abbildung 9 | Schematische Darstellung zweier verschobener Bilder als Erläuterung der oben genannten Formel zur Kreuzkorrelation.

2.4 Stand der Technik

Das erste Autofokussystem mit dem Prinzip des Phasenvergleichs wurde in den 1970er Jahren von Leica entwickelt¹⁶ und auf der *Photokina* 1976 unter dem Namen „*Correfot*“ der Öffentlichkeit vorgestellt. Da dieses System allerdings eine hochfrequent vibrierende Maske vor der Detektorebene¹⁷ benötigte, welche zu dieser Zeit technisch nicht herstellbar war, konnte es sich nicht etablieren. Ungefähr zeitgleich entwickelte die amerikanische Firma *Honeywell* ebenfalls ein Phasenvergleichs-AF-System^{18, 19}, welches sich auf dem Markt durchsetzte und

heute auf dieser Basis von fast allen bekannten Spiegelreflexkameraherstellern genutzt wird^{20, 21} (vgl. Abbildung 10).

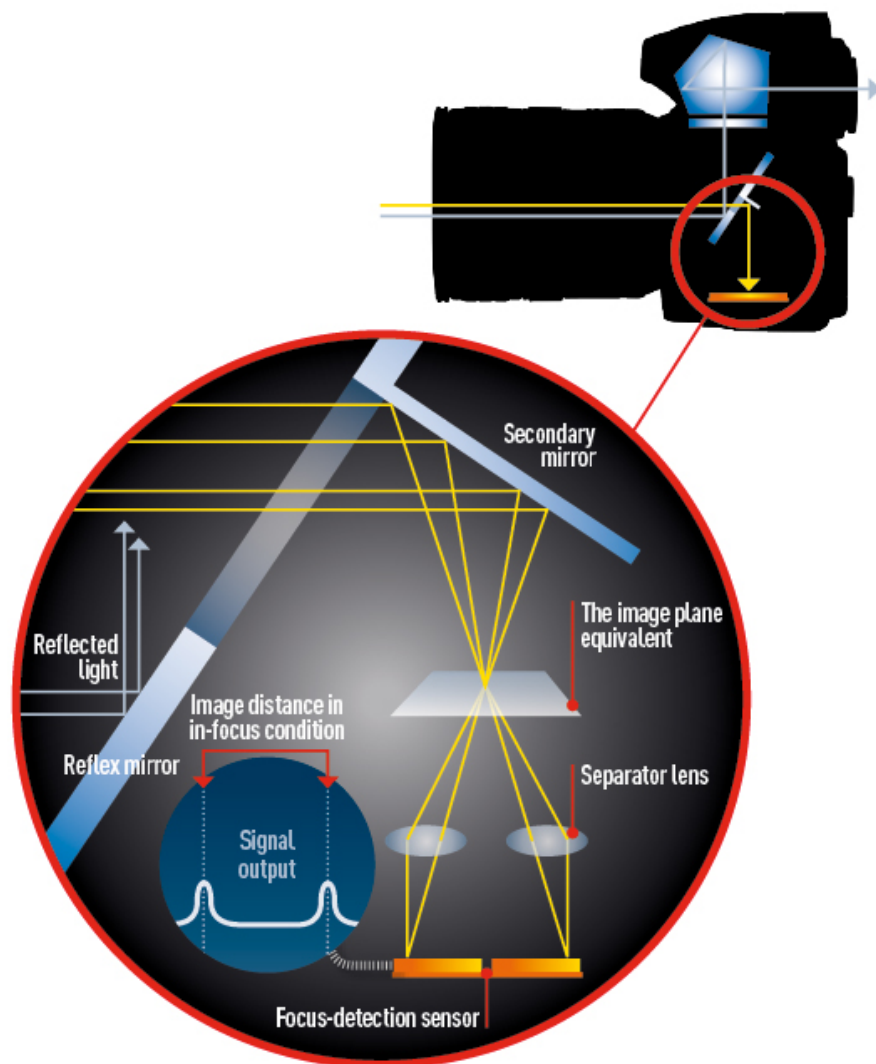


Abbildung 10 | Prinzipieller Aufbau der Phasendetektionseinheit in Spiegelreflexkameras²².

Die verwendete Technik, insbesondere die der Detektoren, ist mittlerweile weit fortgeschritten. Während zu Beginn eine Phasenverschiebung nur an einer Stelle äquivalent zur Sensormitte gemessen werden konnte, wurde die Zahl der Messpunkte mittlerweile erhöht, sodass heutzutage standardmäßig 50 oder mehr Messpunkte über die gesamte Detektorfläche verteilt zur Verfügung stehen²³⁻²⁵. Ein weiterer Entwicklungsschritt wurde durch die sogenannten *cross-type-AF-points*²⁶ erreicht, welche die Phasenabweichung in horizontaler und vertikaler Richtung durch ihre spezielle Ausrichtung noch genauer detektieren können. Als letzter Schritt dieser Entwicklung wurden Sensoren entwickelt, die zusätzlich vertikal ausgerichtet sind²⁷ (s. Abbildung 11).

Gleich ist diesen Ansätzen allerdings, dass sie immer noch zusätzliche optische Elemente zur Strahlteilung und -detektion benötigen. Aber auch hier sind in jüngster Zeit neue Entwicklungen gemacht worden:

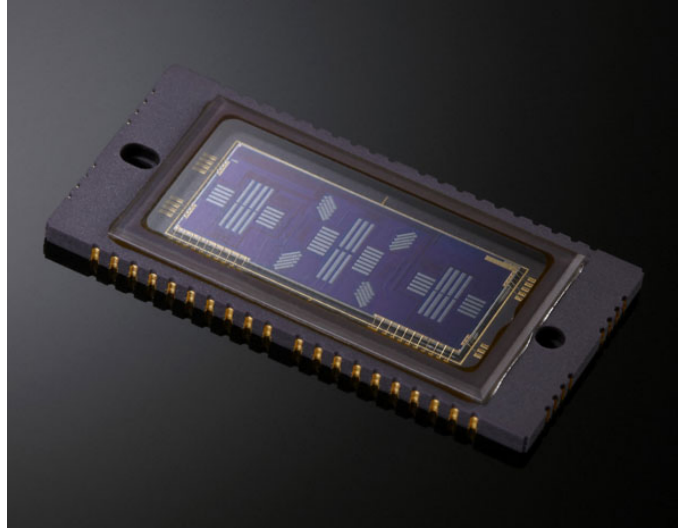


Abbildung 11 | Fortschrittlicher *PD-AF-Sensor (Canon MARK III AF)*, wie er in der *Canon EOS 5D* verwendet wird. Es sind deutlich die unterschiedlichen Ausrichtungen der speziellen Detektoreinheiten für horizontale, vertikale und diagonale Messungen zu erkennen²⁷.

AF für Satellitenkamera:

Ein ganz neuer Ansatz wurde für Satellitenkameras erstellt: Anstatt den Strahlengang für zwei Sensoren aufzuspalten, wird ausgenutzt, dass sich Satelliten in einem bestimmten Orbit mit einer fixen Geschwindigkeit gleichmäßig bewegen. Durch kontinuierliche Aufnahmen entstehen so Kamerabilder die sich zu einem Großteil überlappen. Werden die Überlappungszonen zweier aufeinanderfolgender Bilder verglichen, kann daraus die Defokussierung berechnet werden⁵.

Kompaktere Bauweise:

Die japanische Firma *Asahi* hat 1998 ein System vorgestellt, bei dem ein dichroitisches Prisma verwendet wird. Dieses lässt sichtbares Licht zum Detektor passieren und lenkt nur infrarotes Licht ab um es zur Bestimmung der Defokussierung zu verwenden^{28, 29}.

Noch kompaktere Bauweise:

Bisher galt es als nicht möglich, PD-AF für Kompaktkameras zu adaptieren. Deren Gehäuse sind naturgemäß zu klein um die zusätzlichen optischen Bauelemente aufzunehmen, die für die Strahlaufteilung nötig sind³⁰.

Auf der *Photokina 2010* hat *Fuji* allerdings die erste Kompaktkamera mit „*Hybrid-Autofokus*“ vorgestellt, die *FinePix F300EXR*³¹. Diese detektiert die auszugleichende Defokussierung auf dem Hauptsensor bei ausreichend guten Lichtverhältnissen per Phasendetektion und schaltet bei

Bedarf in den Kontrastdetektionsmodus um³². Um die PD zu realisieren, wurde eine spezielle Sensorarchitektur entwickelt, bei der neben den bildaufnehmenden Pixeln auch solche zur Detektion der Phasendifferenz angebracht sind. Diese entsprechen im Grunde „normalen“ Pixeln, werden aber zur Hälfte maskiert, sodass sie nur das Licht von einer Seite der Linse (links/rechts, oben/unten) registrieren. Dies entspricht von der Idee her dem oben beschriebenen Aufbau (Abschnitt Phasendetektion), bei dem das ankommende Licht durch Linsen, Prismen, oder Spiegel aufgespalten und separiert auf zwei verschiedene Detektoren geleitet wird³³.

Die im Jahre 2013 erschienene Spiegelreflexkamera *Canon EOS 70D* bedient sich einer ähnlichen Technik. Hier sind sämtliche Pixel in je zwei Photodioden unterteilt, um eine Phasendetektion zu ermöglichen. Zur Bildgewinnung wiederum werden die Helligkeitswerte dieser beiden Dioden zusammengerechnet und ergeben einen Bildpunkt²⁴.

Der Vorteil bei diesen beiden Systemen ist, dass auch im sogenannten *Live-View-Modus* und bei Filmaufnahmen kontinuierlich refokussiert werden kann.

Weitere Ansätze:

Neben dieser „herkömmlichen“ Art der Refokussierung gibt es auch Ansätze zur gezielten Scharfstellung von Gegenstandsebenen, die nicht parallel zur Bildebene liegen. Die über die gesamte Detektorfläche verteilten Objektentfernungsmesszonen sind in der Lage, den Winkel schräg verlaufender Gegenstandsebenen zu detektieren. Durch die Verwendung von *Shift/Tilt*-Objektiven oder neigbaren Sensorebenen, kann so unter Anwendung des Scheimpflugprinzips auf diese „schräge“ Gegenstandsebene fokussiert werden¹⁴.

2.5 Ansatz für ein Refokussierungssystem

Die italienische Firma *CGS Benevento* (Teil des *ANTARES*-Konsortiums) hat in Zusammenarbeit mit dem *DLR Berlin* ein System zur Refokussierung, basierend auf der oben vorgestellten Phasenvergleichsmethode entworfen (s. Abbildung 12 und Abbildung 13).

Hierbei wird ein Teil des Strahlenganges am Rande des Feldes über einen Umlenkspiegel in Richtung der Detektoreinheit für den Phasenvergleich reflektiert. Dieses Feld wird wiederum über einen Prismenspiegel geteilt und die jeweiligen Teilbilder auf Detektoren umgelenkt. Bei defokussiertem Motiv kann hier nach der oben beschriebenen Methodik eine Defokussierung detektiert und aus den gewonnen Werten die nötige Refokussierungsbewegung errechnet werden.

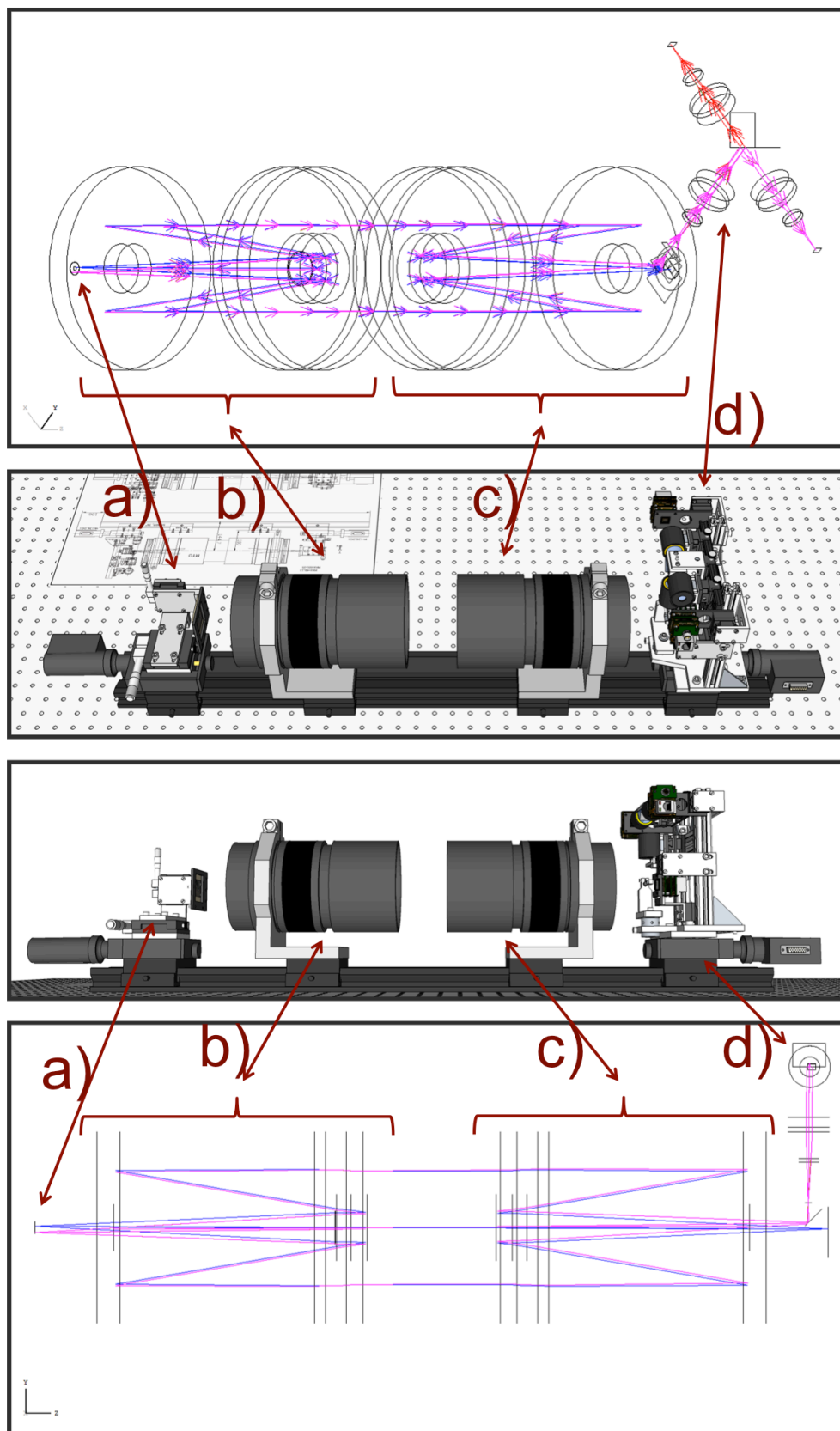


Abbildung 12| Anordnung der italienischen *ARMES*-Variante. a) verstellbares *Target* [z. B. Dia, Siemensstern] und Hinterleuchtung; b) Teleskop [*MTO*] bildet *Target* nach unendlich ab; c) Teleskop [*MTO*, baugleich mit b)] fokussiert eingehende Strahlen auf Detektorebene [vgl. Abbildung 13 d)]; d) eigentlicher Aufbau zur Bildaufnahme und Detektion der Defokussierung und zum Refokussieren.

Durch den Einsatz zweier baugleicher *Maksutov Spiegelteleskope (MTO)* entsteht eine sogenannte Relaisoptik, die ein Bild aus dem Brennpunkt des vorderen Teleskops 1:1 in den Brennpunkt des zweiten *MTOs* abbildet. Das vordere *MTO* hat dabei ausschließlich die Aufgabe, ein definiertes, paralleles Lichtbündel zu erzeugen, welches das *Target* nach unendlich abbildet. Durch eine Bewegung des *Targets* aus dem objektseitigen Brennpunkt hinaus konvergiert oder divergiert das austretende Lichtbündel, mit dem Resultat, dass sich der Brennpunkt des hinteren *MTOs* verschiebt. Dadurch kommt es einerseits zu Unschärfe auf dem bildaufnehmenden Hauptsensor (Abbildung 13 f), da sich dieser genau in der bildseitigen Brennweite des zweiten *MTOs* befindet. Andererseits, kommt es zu einer Phasenverschiebung auf den beiden Sekundärdetektoren, welche gemessen wird, um die Verschiebung des *Targets* zu bestimmen.

Dieses Design hat verschiedene Nachteile:

- 1) Da das Felddbild aus den Randstrahlen abgegriffen wird, kann es bei nicht perfekter Optik Verzerrungen aufweisen, die die Berechnung der nötigen Refokussierung beeinträchtigen.
- 2) Die beiden Defokus-Detektoreinheiten sind in vertikaler Richtung angebracht, wodurch das System anfällig für Schwingungen ist.
- 3) Durch den vertikalen Aufbau kann es zu einer thermischen Beeinflussung kommen.
- 4) Das System ist nur zum Testen *einer* Optik geplant. Mit einem modularen System, welches verschiedene Objektive/ Teleskope aufnehmen kann, könnte man verschiedene optische Übersetzungsverhältnisse realisieren.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, dieses Konzept zu optimieren, es aufzubauen und den grundsätzlichen Nachweis der Funktionsfähigkeit des Systems zu erbringen.

Vorteile des am DLR geplanten Systems:

- 1) Das System ist nicht nur für eine Optik geplant, sondern kann verschiedene gängige Objektive aufnehmen. Dadurch können verschiedene optische Übersetzungsverhältnisse realisiert werden.
- 2) Der am DLR zur Verfügung stehende Kollimator ($f = 1200 \text{ mm}$, $f/8$) lässt eine definierte Defokussierung über eine intrinsische Skala zu.
- 3) Der Kollimator hat eine sehr gute Strahlführung über das ganze Feld, ist von der Bildqualität her nahezu beugungsbegrenzt.
- 4) Der Kollimator verfügt über eigene, hochpräzise *Targets*, die an definierter Stelle eingeschoben werden können. So ist eine große Wiederholgenauigkeit gewährleistet.
- 5) Durch die eingebaute Beleuchtung können die beiliegenden *Targets* ideal beleuchtet werden.

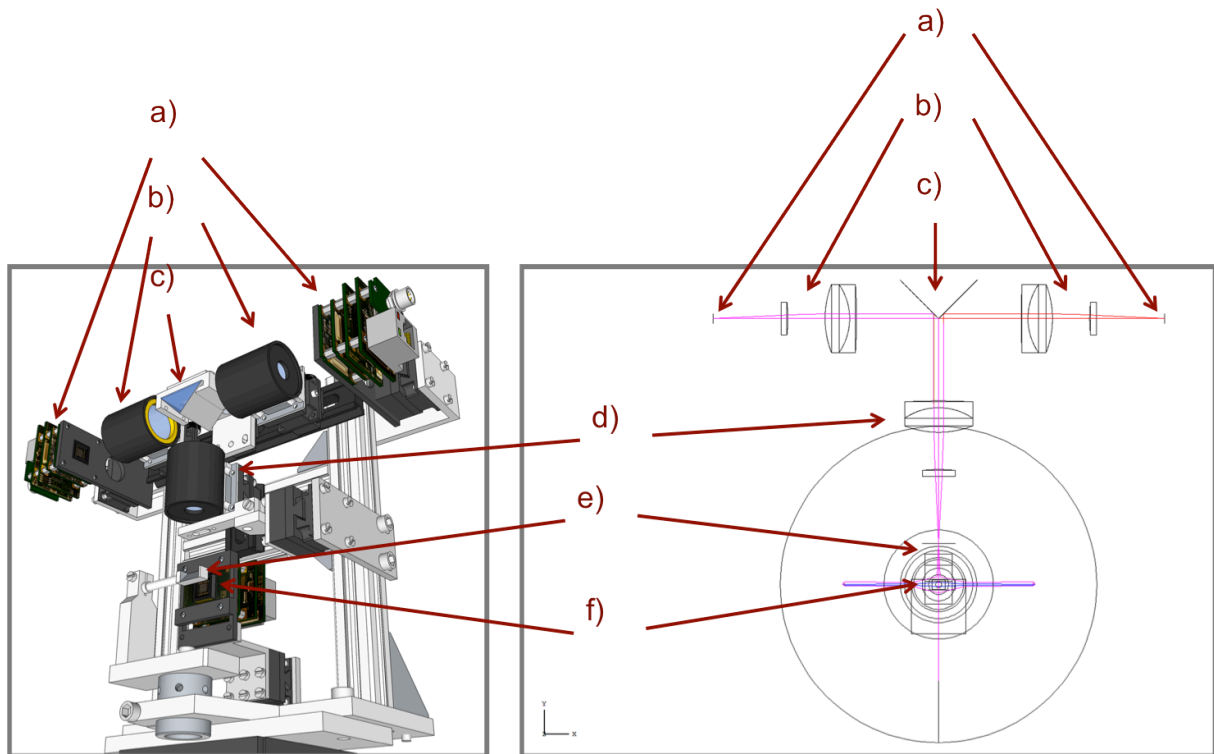


Abbildung 13 | Aufbau der Detektorebene des italienischen *ARMES*-Entwurfs. a) Sensorebenen zur Detektion der Phasenverschiebung; b) Fokussieroptiken; c) prismatischer Spiegel zur Feldteilung d) Optik zur Erzeugung eines parallelen Strahlenganges; e) Umlenkspiegel, der einen Teil des Feldes abgreift und auf die Defokusdetektorebene umlenkt; f) eigentlicher bildaufnehmender Sensor.

3 Konzipierung des Versuchsaufbaus – Projektplanung und Umsetzung

Die Konzipierung besteht aus der Zusammenführen dreier Teilbereiche, in welche dieses Kapitel auch unterteilt ist: Optik, Mechanik/Konstruktion und Elektronik/Informatik.

Im ersten Abschnitt wird die Veränderung und Anpassung des vorhandenen Aufbaus geplant. Daraufhin werden im zweiten Abschnitt die Anforderungen an das erstellte Design analysiert und Lösungsansätze zur Umsetzung erarbeitet. Der letzte Abschnitt behandelt die Konzipierung der nötigen elektronischen Elemente zur Detektion und Kompensation der Defokussierung. Es werden die Hardwarekomponenten und der generelle schematische Ablauf beschrieben. Die eigentliche Programmierung und elektronische Bildverarbeitung wird in der Bachelorarbeit von Müller-Rowold⁶ besprochen.

Das im Folgenden verwendete Koordinatensystem orientiert sich am Verlauf der optischen Achse des Kollimators, welche der z-Achse entspricht (vgl. Abbildung 14).

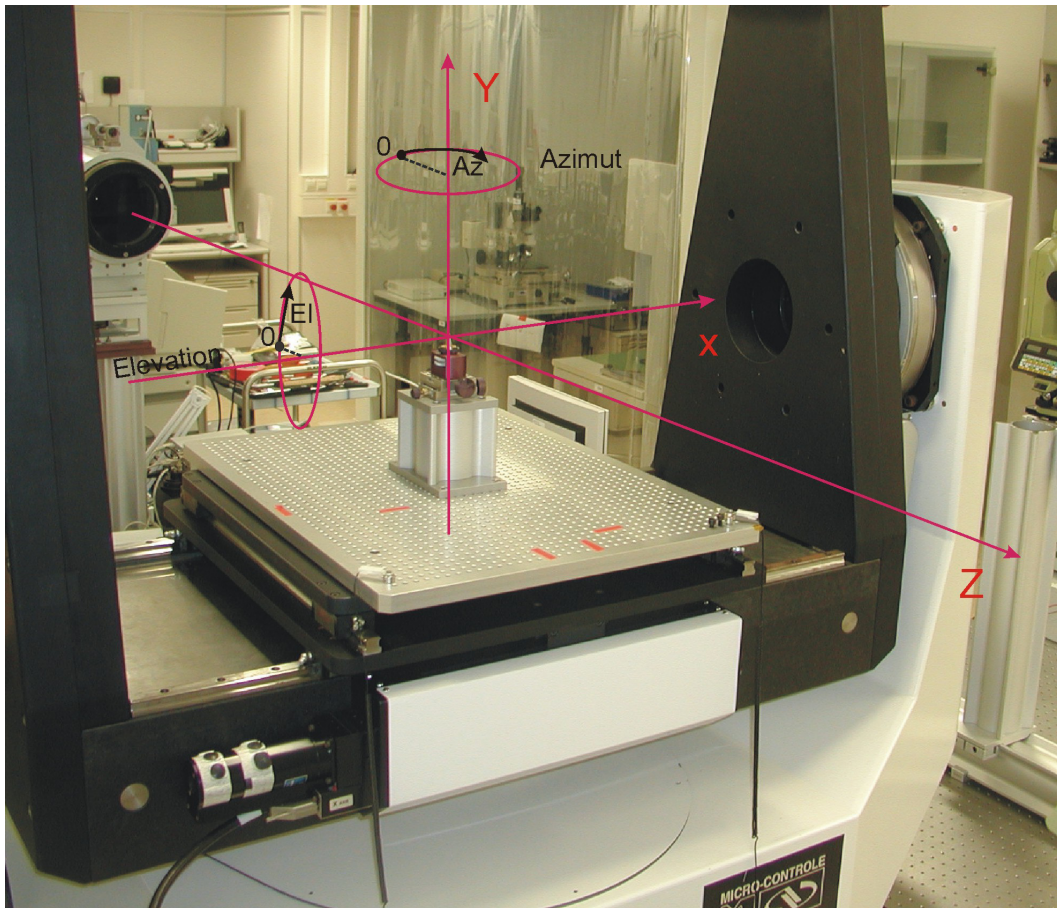


Abbildung 14| Darstellung der Lage des Koordinatensystem auf dem *Gimbal*, der als Arbeitsplattform dient. Im Hintergrund ist der Linsenkollimator zu erkennen.

3.1 Anpassung des vorgegebenen Optikdesigns

Das ursprüngliche optische Design der italienischen Firma *CGS Benevento* ist ausgereift, weshalb die im Folgenden aufgeführten Änderungen nicht ausschließlich aufgrund optischer Kriterien nötig sind. (Das Originaldesign ist im Anhang auf CD beigelegt.)

Eine der grundlegenden Forderungen war es, eine größere mechanische Stabilität zu gewährleisten. Dafür wurde das Design so geändert, dass die Detektoreinheit für die Phasenverschiebung in einer Ebene mit dem Hauptdetektor liegt.

Außerdem sollte der Strahlengang vereinfacht werden. Wie oben erwähnt, soll ein autonomer Refokussierungsmechanismus in das Portfolio des *DLR* aufgenommen werden, weshalb es wichtig ist, die grundlegenden Funktionsweisen und Schwierigkeiten eines solchen Konzeptes zu verstehen. Aus diesem Grunde wird es als sinnvoll erachtet, das ursprüngliche Design von allem zu befreien, was zusätzliche, nicht grundlegende Fehler verursachen könnte. Hierfür ist es nicht nötig, eine aufwendige Optiko Optimierung durchzuführen, weshalb im eigenen *Zemax*-Modell Paraxiallinsen verwendet werden. Diese sind ausreichend, um das Grundprinzip darzustellen und zu simulieren.

3.1.1 Erhöhung der mechanischen Stabilität

Wie bereits im Kapitel *Grundlagen* beschrieben, zeichnet sich das ursprüngliche Design dadurch aus, dass die Detektoreinheit zur Bestimmung der Defokussierung senkrecht zur Grundplatte steht. Vergleiche hierzu Abbildung 12: Auf der rechten Seite ist die freistehende Detektoreinheit zu erkennen, die über einen Umlenkspiegel gespeist wird, der am Rand des Feldes angebracht ist. Der bildaufnehmende Hauptdetektor ist darunter angebracht. Dadurch ist sie anfällig für Schwingungen und Erschütterungen sowie eventuelle thermische Einflüsse des darunter angebrachten Hauptdetektors.

Um diesen Umstand zu beseitigen, wird der komplette Detektorbereich auf einer Grundplatte angebracht, sodass Vollbilddetektor und Defokusdetektoren in einer Ebene liegen (vgl. Abbildung 15). Zusätzlich wird der kleine Umlenkspiegel am Rand des Feldes durch einen Strahlteilerwürfel ersetzt. Die freiliegenden Detektoren und Linsen werden durch Standardkameras und passende Objektive ersetzt und sind hier durch Paraxiallinsen und Detektoren dargestellt.

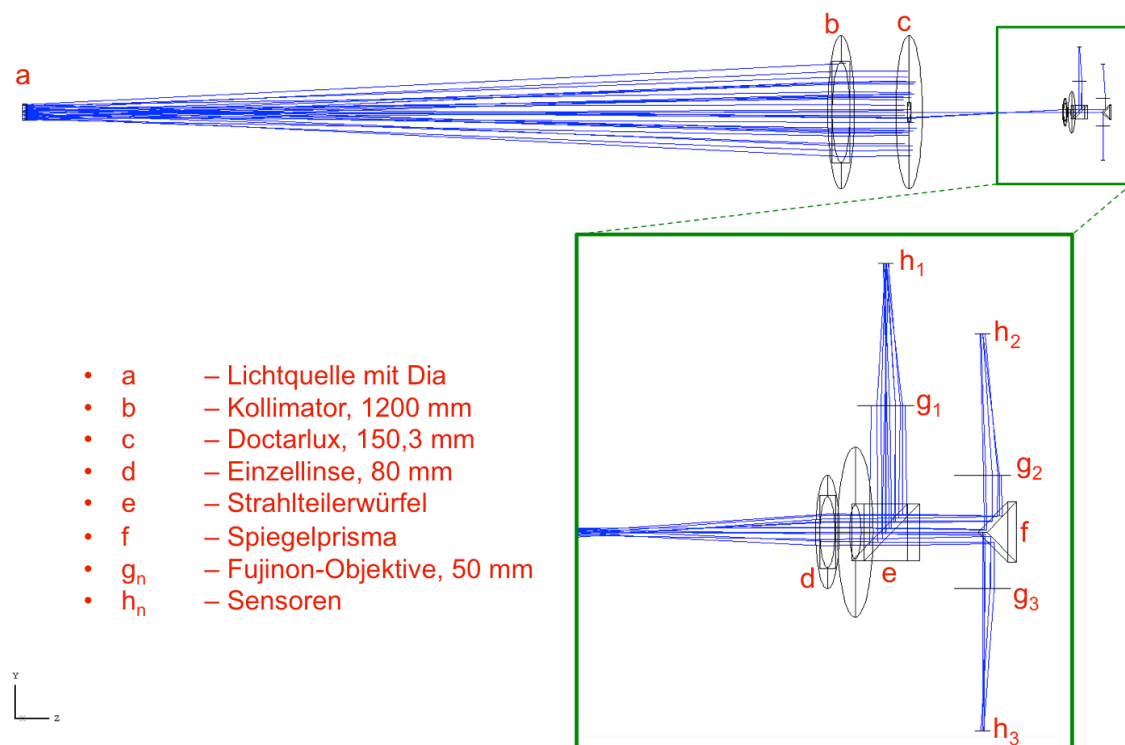


Abbildung 15 | Veränderter Strahlengang, Draufsicht. Sämtliche Linsen/ Objektive/ etc. sind Paraxiallinsen.

3.1.2 Vereinfachung des Strahlenganges

Zudem wird der Strahlengang erheblich vereinfacht (vgl. Abbildung 12 mit Abbildung 15).

- Zuerst werden die freistehenden Linsen und Detektoren durch Standardkameras mit entsprechenden passenden *C-Mount*-Objektiven ersetzt. Diese bieten eine ausreichend hohe Genauigkeit was Aberrationen und Abstände der Linsen zu den Kameradetektoren betrifft und sind aufgrund vorgegebener Bohrungen leicht zu justieren. Auch sind sie unempfindlich gegenüber Verschmutzungen.
- Der Hauptdetektor befindet sich nun nicht mehr direkt im Fokus des Teleskops. Stattdessen wird die Abbildung des Kollimator – Objektiv – Systems von einer zusätzlichen Linse aufgenommen und in einen parallelen Strahlengang umgewandelt. Dieser wird durch einen Strahlteilerwürfel zu gleichen Teilen auf Haupt- und Defokusdetektoren umgelenkt und bietet den Vorteil, dass nun sämtliche Lichtwege gleich lang sind. Somit kann es zu keinen Unstimmigkeiten aufgrund unterschiedlicher Weglängen zwischen den Detektoren kommt.
- Der kleine Umlenkspiegel am Rand des Feldes vor dem Hauptdetektor wurde durch den oben erwähnten Strahlteilerwürfel ersetzt. Einerseits ist zu erwarten, dass am Rand des Feldes Aberrationen auftreten, die die Bestimmung der Defokussierung stören. Andererseits ist der Spiegel an einer Stelle angebracht, an der kein paralleler Strahlverlauf besteht. Bei starker Defokussierung könnte der einfallende Strahl diesen Spiegel verfehlen, sodass kein oder zu wenig Licht auf die Defokusdetektoren fällt.
- Des Weiteren wird zusätzlich der spiegelsymmetrische Aufbau mit zwei *Maksutov* Spiegelteleskopen verworfen. Stattdessen wird für die Schaffung eines parallelen Strahlenganges ein im Labor vorhandener Linsenkollimator benutzt, hinter der eine Halterung für verschiedene Objektive angebracht wird. Dies hat den Vorteil, dass durch eine Variation der Brennweiten diverser Objektive/Teleskope verschiedene Übersetzungsverhältnisse zwischen Gegenstands- und Bildweitenänderung erzielt werden können, wodurch die Systemgrenzen genau erforscht werden können.

Der Kollimator weist zudem noch weitere Vorteile auf:

- verschiedene, hochpräzise *Targets*, die an definierter Stelle eingesetzt und mittels einer eingebauten Beleuchtung homogen ausgeleuchtet werden können.
- Es ist eine definierte Defokussierung der *Targets* (Gegenstandsweitenänderung) über eine eingebaute Noniusskala möglich.
- Der Kollimator hat eine nahezu beugungsbegrenzte Abbildung.

3.2 Konstruktives Design des Versuchsaufbaus

Zur Konzipierung des Versuchsaufbaus wird auf Methoden des Konstruktiven Entwicklungsprozesses (KEP) zurückgegriffen³⁴. Als Grundlage dient eine *Anforderungsliste zur Projektübersicht*, die einen Überblick über die gesamten Anforderungen erlaubt. Diese beinhaltet alle wichtigen Informationen zu nötigen Funktionen, Geometrie und Kinematik des Gesamtsystems und der Einzelsysteme (ES). Die Anforderungsliste beinhaltet folgende unterschiedliche Systeme:

1. **Gesamtsystem** (Ges), beinhaltet nötige Angaben zum gesamten Versuchsaufbau;
2. **Objektive und Teleskope** (O/T), beschreibt die notwendigen Spezifikationen für die Optiken zwischen Kollimator und Detektoreinheit;
3. **Optikkomponenten** (Opt), enthält sämtliche nötigen Optikkomponenten (Linsen, Strahlteiler, Kameras) sowie deren Halterungen;
4. **Manipulatoreinheit** (Man), mit der die eigentliche Refokussierungsbewegung realisiert wird, sowie
5. **Elektronikeinheit** (EA) zur Datenverarbeitung der Bilder und der Ansteuerung des Manipulators.

Auf Basis dieser Anforderungsliste wird eine grafische Darstellung erstellt, bei der durch Abstrahieren und grundlegende Funktionsanalyse der Kern der Aufgabenstellung freigelegt wird. Die Gesamtfunktion wird hierfür in Teilfunktionen (TF) und deren Unterfunktionen (UF) unterteilt. Schließlich erfolgt eine morphologische Analyse mit Auflistung und Bewertung einzelner Prinzipiösungsmöglichkeiten für die herausgearbeiteten Funktionen. Diese werden bewertet und daraufhin die besten Lösungen für das finale Konzept zusammengeführt.

3.2.1 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste gliedert sich in die drei Teile

- **Funktion** (Tabelle 2): Formulierung grundlegender Ansprüche an Gesamt- und Teilsysteme.
- **Geometrie** (Tabelle 3): Angabe aller bekannten Maße und Bestimmung der Grenzen der zu entwickelnden Systeme.
- **Kinematik** (Tabelle 4): Ansprüche an die benötigten Freiheitsgrade der Einzelsysteme.

Tabelle 2| Anforderungsliste zum Projekt „Aufbau und Integration eines automatischen Refokussierungsmechanismus in einen vorhandenen Laboraufbau“, Abschnitt *Funktion*.

Die Einzelsysteme (ES) sind folgendermaßen abgekürzt: Gesamtsystem (Ges), Objektive und Teleskope (O/T), Optikkomponenten zur Detektion der Refokussierung und Bildaufnahme (Opt), Manipulator zur Refokussierung (Man), Elektronische Auswerteinheit (EA).

Teil 1: Funktion				
#	ES	Beschreibung	Werte, Daten, Erläuterungen	Anmerkungen
1	Ges	Integration <ul style="list-style-type: none"> • div. Objektive/ Teleskope • div. Komponenten zur Defokusbestimmung • Refok.-mechanismus in vorhandenen Laboraufbau 		Die Einzelkomponenten sind teilweise voneinander abhängig, die Anpassungen müssen rückkoppelnd erfolgen.
2	O/T	Objektiv/ Teleskop zur Bündelung des parallelen Strahlenganges des Laborkollimators.	Versch. Objektive um div. Übersetzungsverhältnisse zu realisieren um Genauigkeit des ARMES zu bestimmen.	z. B. <ul style="list-style-type: none"> • MTO (1000 mm, f# 10) – gute opt. Abb. bei geringem Preis; • Doctarlux (150 mm, f# 10) – gute opt. Abb., bereits vorhanden
3	O/T	Halterung der verschiedenen Objektive	Muss Höhe der opt. Achse genau treffen.	System muss diverse Objektive aufnehmen können.
4	O/T	Fixierung des Halters auf Positionierelement (#5)	Muss lösbar und wiederverwendbar sein,	Integration in Nr. 3 möglich?
5	O/T	Positionierung und Justierung der gehalterten Objektive zu opt. Achse d. Kollimators	Translation in x, y, z Rotation um x, y (z = opt. Achse)	Feinausrichtung muss möglich sein.
6	O/T	Fixierung der positionierten und justierten Objektive	Muss lösbar sein.	Integration in Nr. 5
7	Opt	Linse zur Abbildung des Bildes der Objektive/ Teleskope nach unendlich		Soll „entspanntes“ Bild liefern, also keine zu kurze Brennweite
8	Opt	Halterung und Fixierung der Linse	Muss Höhe der opt. Achse genau treffen.	
9	Opt	Positionierung des Halters #8 entlang der opt. Achse	Translation entlang opt. Achse muss möglich sein.	Feinausrichtung muss möglich sein. Integration in Nr. 8
10	Opt	Strahlteilerwürfel zur Teilung des Strahles der von der Linse #7 kommt		

11	Opt	Halterung und Fixierung des Strahlteilerwürfels	Muss Höhe der opt. Achse genau treffen.	Würfel kann geklebt werden um feste Verbindung zu schaffen.
12	Opt	Positionierung des Halters #11 zur opt. Achse	Translation entlang opt. Achse muss möglich sein. Rotation um z	Feinausrichtung muss möglich sein.
13	Opt	Strahlteilerprisma zur Teilung des Strahles, der vom Strahlteilerwürfel #10 kommt zu den Kameras 2 und 3		
14	Opt	Halterung und Fixierung des Strahlteilerprismas	Muss Höhe der opt. Achse genau treffen.	Prisma kann geklebt werden um feste Verbindung zu schaffen.
15	Opt	Positionierung des Halters zur opt. Achse	Translation in z Rotation um z	Feinausrichtung muss möglich sein.
16	Opt	3 gleiche Kameras Objektive inkl. passender Objektive	kompakte Bauweise, gute Auflösung (kleine Pixelgröße)	
17	Opt	Halterung für die Kameras	Muss Höhe der opt. Achse treffen.	
18	Opt	Positionierung der Halter entlang der umgelenkten opt. Achse	Translation entlang umgelenkter opt. Achse muss möglich sein.	
19	Man	Halterung der Optikkomponenten zur Detektion der Defokussierung und Bildgewinnung		Feste, reversible Verbindung zwischen Manipulator und Detektoreinheit nötig
20	Man	Ausrichtung und Positionierung der Optikkomponenten	Ausreichend großer Spielraum für Positionierung nötig	
21	Man	Durchführung der Refokussierungsbewegung	Ausreichend großer Spielraum für Refokussierungsbewegung nötig	Manipulator muss elektronisch ansteuerbar sein, um Refokussierung zu automatisieren.
22	EA	Auswertung der Bilder/ Bestimmung der Defokussierung	nötig: Monitor, Rechner (Schnittstellen für Kameras, Speicher für Bilder)	Software wird von Gustav Malte Müller-Rowold erstellt
23	EA	Umrechnung der detektierten Defokussierung in Manipulatorbewegung zur Refokussierung		Software wird von Gustav Malte Müller-Rowold erstellt
24	EA	Ansteuerung des Manipulators zur Refokussierung		Software wird von Gustav Malte Müller-Rowold erstellt

Tabelle 3| Anforderungsliste, Abschnitt *Geometrie*.

Teil 2: Geometrie				
#	ES	Beschreibung	Werte, Daten, Erläuterungen	Anmerkungen
25	Ges	Höhe optische Achse des Kollimators über Tisch	930 mm	vgl. Abbildung 16
26	Ges	Durchmesser AP Kollimator	155 mm	
27	Ges	Höhe Arbeitsplattform des Gimbal über Tisch	743 mm (Differenz zur opt. Achse des Kollimators: 187 mm)	vgl. Abbildung 16
28	Ges	Abstand Ende Kollimator – Anfang Arbeitsplattform auf Gimbal	1180 mm	vgl. Abbildung 16
29	Ges	Abmaße der Arbeitsplattform des Gimbal	L (in z-Richtung): 650 mm B: 460 mm Gewindebohrungen: M6 Bohrungsabstand: 12,5 mm	Die Halterung für die Objektive/ Teleskope (# 2 ... 6) und die Refokussierungseinheit inkl. Optikaufbau (# 7 ... 22) müssen auf der Arbeitsplattform Platz finden
30	O/T	Maße <i>MTO</i>	Außendurchm: 126 mm Länge: 238 mm Masse: 2500 g Stativgewindeanschluss: 1/4" und 3/8" (2 x um 90° versetzt)	s. nachfolgende Bemerkung
31	O/T	Maße andere Objektive	Variabel! Außendurchm: 40...160 mm Länge: 25...400 mm Masse: 50...3000 g Maße mögl. Haltepunkte für Objektive (Stelle an Objektiv wo Halter greifen könnten): i. d. R. ≥ 7 mm	Versch. Objektive und Teleskope haben div. intrinsische Anschlüsse. Es muss ein System gefunden werden, das unabhängig davon verschiedenste Objektive/ Teleskope aufnehmen kann.
32	O/T	Maße Objektivhalter	Noch unbestimmt! Opt. Achse der Elemente muss mit Opt. Achse des Kollimators identisch sein. Aufbau kompakt	
33	Opt	Maße Detektoreinheit (Linsen, Strahlteiler, Kameras)	Noch unbestimmt! Opt. Achse der Elemente muss mit Opt. Achse des Kollimators identisch sein. Aufbau kompakt	

34	Man	Maße Manipulator	Noch unbestimmt! Muss Detektoreinheit auf Höhe der opt. Achse halten.	Muss sich am optischen Aufbau der Detektoreinheit orientieren
----	-----	------------------	---	---

Tabelle 4| Anforderungsliste, Abschnitt *Kinematik*.

Teil 3: Kinematik				
#	ES	Beschreibung	Werte, Daten, Erläuterungen	Anmerkungen
35	O/T	Bewegungsrichtung der Objektive/ Teleskope	Translation in x,y,z	O/T werden anfangs zur opt. Achse des Kollimators ausgerichtet und positioniert. Detektoreinheit wird hierauf ausgerichtet.
36	Opt	Bewegungsrichtung der Linse	Translation in z-Richtung	Zur Fokussierung auf Bild des O/T
37	Opt	Bewegungsrichtung Strahlteilerwürfel und -prisma	Translation in z-Richtung Rotation um z-Richtung	Zur Ausrichtung auf nachfolgende Kameras.
38	Opt	Bewegungsrichtung der Kameras	Translation entlang umgelenkter opt. Achse	Zur Einstellung einer gleichmäßigen Entfernung aller Kameras zum Bild des O/T.
39	Man	Bewegungsrichtung	Translation in x,y,z	Zur Positionierung aller darauf befindlichen Optikelemente zur optischen Achse: x- und y- Translation einmalig, muss nach Einstellung nicht wieder bewegt werden. Manipulator muss diese Position aber unverändert halten können. z-Translation muss zur Refokussierung elektronisch ansteuerbar und wiederholbar sein

3.2.2 Unterteilung der Hauptfunktionen in Teil- und Unterfunktionen

Die Konzipierung des mechanischen Designs lässt sich in drei Hauptfunktionen (HF) unterteilen:

1. Aufnahme und Positionierung verschiedener Objektive/ Teleskope vor dem Refokussierungssystem und den Detektoren.
2. Positionierung und Führung aller optischen Elemente der Detektoreinheit.
3. Ausrichtung und Refokussierung der Detektoreinheit.

Bei allen drei Funktionen muss zusätzlich zum eigentlichen Design darauf geachtet werden, dass das Konzept an das vorhandene Laborequipment angepasst wird (vgl. Abbildung 16).

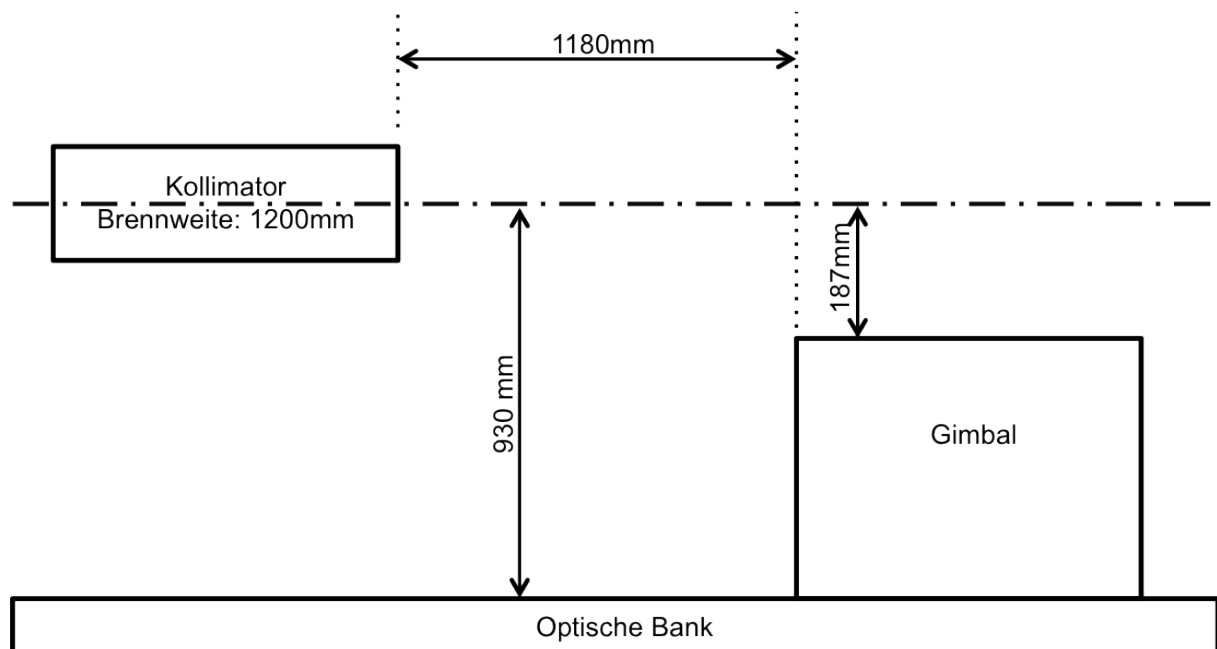


Abbildung 16 | Schematische Darstellung der vorhandenen Aufbauten im Optiklabor.

3.2.2.1 Aufnahme und Positionierung verschiedener Objektive/ Teleskope

Die Hauptfunktion *Fassung und Positionierung verschiedener Objektive* (Abbildung 17) kann in die beiden Teilfunktionen *Halterung* und *Ausrichtung* gegliedert werden. Obwohl die abstrakte Darstellung der Unterfunktionen der *TF Ausrichtung* von den verwendeten Begriffen her gleich ist, unterscheiden sie sich jedoch stark in der Anforderung und somit in der Möglichkeit der Umsetzung. Deshalb wird im folgenden Abschnitt eine morphologische Analyse durchgeführt, in der verschiedene Lösungsmöglichkeiten für die einzelnen Funktionen aufgeführt und bewertet werden (s. Abschnitt 3.2.3 *Morphologisch Analyse*).

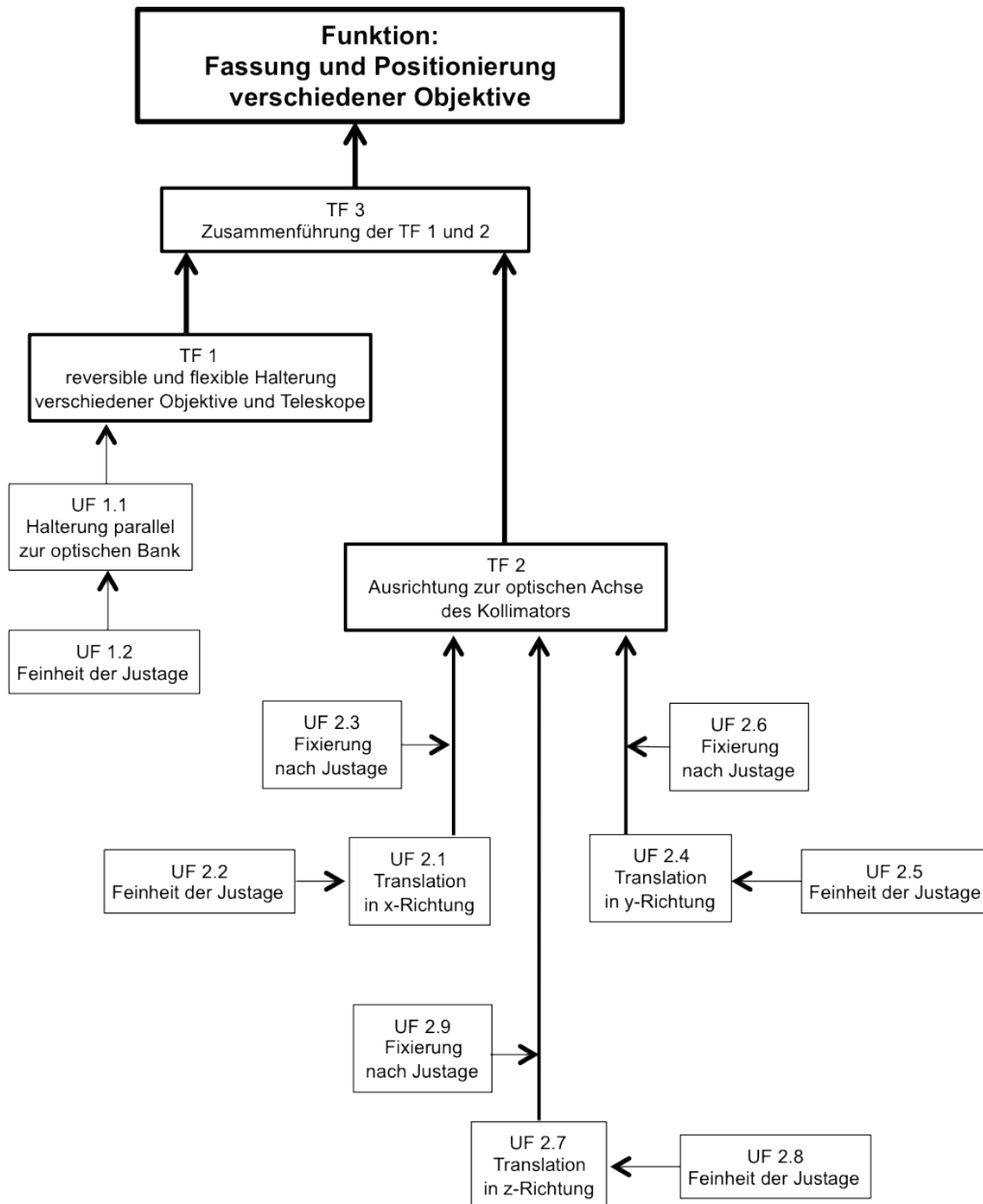


Abbildung 17| Grafische Darstellung der Hauptfunktion 1 und der abgeleiteten Teil- und Unterfunktionen (TF, UF).

3.2.2.2 Positionierung und Führung aller optischen Elemente der Detektoreinheit

Die einzelnen Teil- und Unterfunktionen sind von der Formulierung der abstrakten, grundlegenden Anforderungen gleich (vgl. Abbildung 18), da alle entsprechenden optischen Bauteile auf der optischen Achse, bzw. deren Abzweigungen liegen und an dieser ausgerichtet werden müssen. Nur für den Strahlteilerwürfel und das Feldteilerprisma kommen zusätzliche Unterfunktionen hinzu, da sie Zweigpunkte der optischen Achse darstellen. Sie müssen deshalb rotatorisch auszurichten sein, um die Abbildung korrekt zu den nachfolgenden Elementen reflektieren zu können.

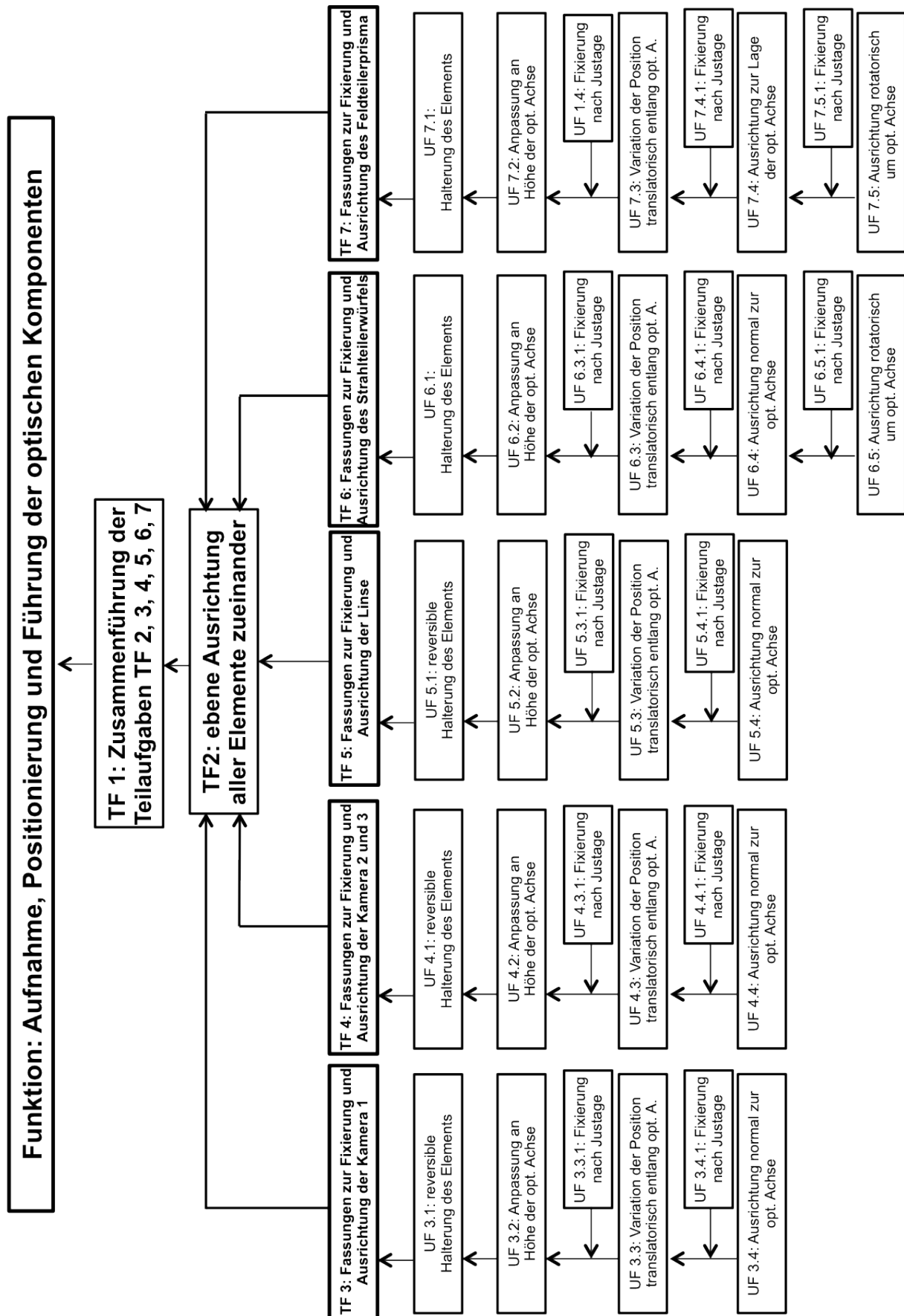


Abbildung 18| Grafische Darstellung der Hauptfunktion 2 und der abgeleiteten Teil- und Unterfunktionen (TF, UF).

Außerdem wurden die TF und UF für die Kameras 2 und 3 zusammengefasst, da sie beide spiegelsymmetrisch zur optischen (Haupt-)Achse des Gesamtsystems liegen (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 19) und somit gleich behandelt werden können.

Auf die Aufstellung eines vollständigen Lösungssystems (morphologisch Analyse), in dem alle möglichen Lösungsmöglichkeiten für die einzelnen TFs und UF aufgeführt und bewertet werden, wird an dieser Stelle verzichtet. Ein solches Lösungssystem eignet sich am ehesten zur Beurteilung von Aufgabenstellungen, bei denen selbstentworfenen Teile gefertigt werden sollen. Im vorliegenden Fall gibt es allerdings fertige Lösungen zahlreicher Hersteller, auf die zurückgegriffen werden kann und die nicht, oder nur minimal modifiziert werden müssen um die gewünschten Kriterien zu erfüllen. Zur Umsetzung der einzelnen Funktionen werden Elemente des Herstellers *Qioptiq* verwendet, weil diese das beste Preis-Leistungsverhältnis aufweisen. Als Basis dient dabei das Schienensystem *LINOS Mikrobank* (vgl. Abbildung 19). Die Höhe der optischen Achse dieses Systems beträgt 20 mm und bietet standardmäßig alle für diesen Aufbau nötigen Komponenten zur Halterung, Positionierung und Justierung. Lediglich für die Kameras müssen Adapterplatten gefertigt werden; um sie auf den Reitern des Schienensystems zu halten und um die korrekte Höhe der optischen Achse zu erreichen.

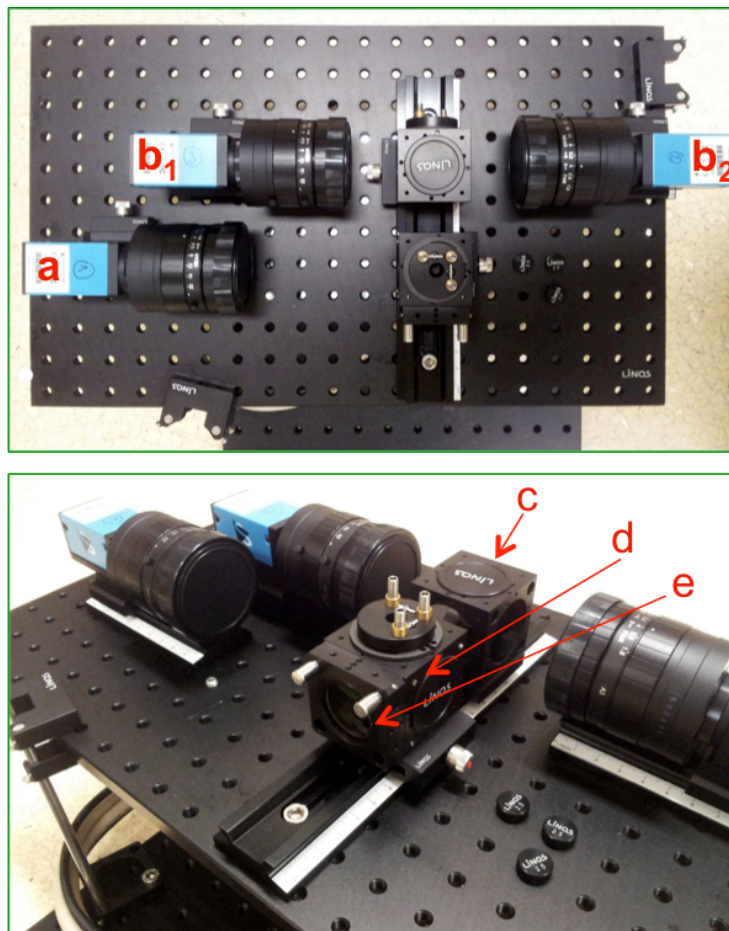


Abbildung 19 Aufbau der Detektoreinheit. Zu erkennen sind: a) Vollbildkamera, b_{1,2}) Kameras zur Detektion der Phasenverschiebung, c) Halterung für Prismenspiegel, d) Halterung für Strahlteilerwürfel, e) Einzellinse.

3.2.2.3 Ausrichtung und Refokussierung der Detektoreinheit

Auch in dieser abstrakten Darstellung sind die einzelnen Teilfunktionen wieder gleich, da in allen Fällen die Detektorplattform positioniert werden muss. Lediglich bei der Translation in z-Richtung kommt die Forderung nach einer Refokussierungsbewegung hinzu. Da auch diese Anforderungen durch existierende Produkte erfüllt werden können; wird hierbei ebenfalls auf eine morphologische Analyse verzichtet.

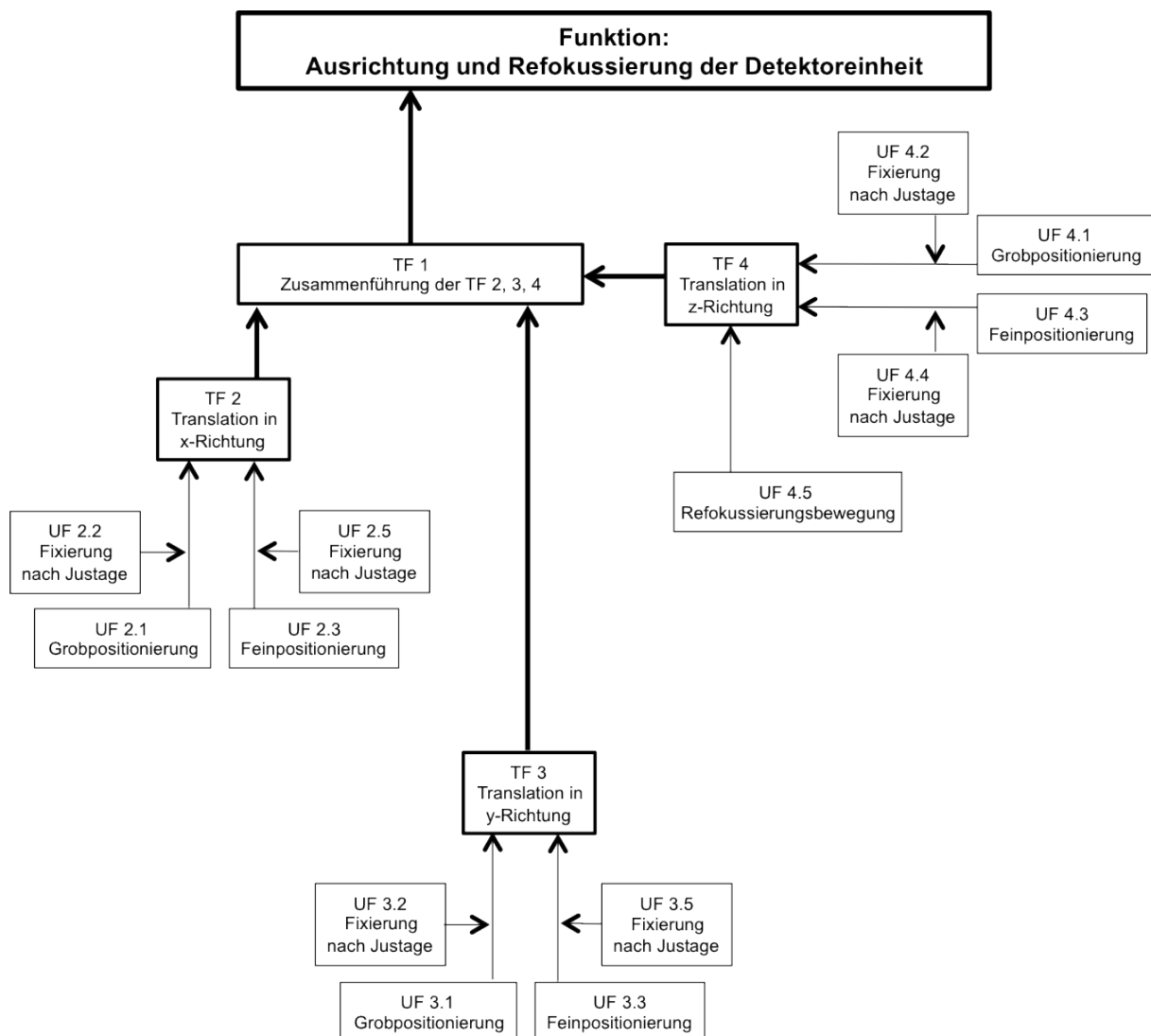


Abbildung 20 | Grafische Darstellung der Hauptfunktion 3 und der abgeleiteten Teil- und Unterfunktionen.

Ein Lösungsansatz ist, die nötigen Positionierungsbewegungen in x- und y-Richtung mit Hilfe von manuellen Linearpositionierern einzustellen. Die Bewegung in z-Richtung hingegen muss mit einer elektronisch ansteuerbaren Einheit erfolgen, da die Refokussierungsbewegung automatisiert werden soll. Da die Detektoreinheit jedoch sehr groß ist (ca. 22 cm x 32 cm) und

eine große Masse hat (ca. 4,5 kg) ist es schwierig eine Kombination von Lineartischen zu finden, die die Last und die auftretenden Scherkräfte aufnehmen können, dabei aber kompakt gebaut sind. Letzteres ist aufgrund des limitierten Abstandes von Arbeitsplatte des *Gimbal* zur optischen Achse (vgl. Abbildung 16) allerdings eine Grundvoraussetzung.

Deshalb wird der Einsatz eines Hexapods (*M-810* der Firma *PI*) beschlossen, welcher den Anforderungen gerecht wird (vgl. Abbildung 22). Außerdem bietet er den Vorteil sehr kleiner Schrittweiten, was für eine exakte Refokussierung unabdingbar ist.

Zusätzlich hat er den Mehrwert, neben den translatorischen Bewegungen auch rotatorische Bewegungen zu ermöglichen, was für folgende Experimente im Optiklabor vorteilhaft ist.

3.2.3 Morphologische Analyse

Im Gegensatz zu allen anderen Einheiten ist die *Einheit zur Fassung und Positionierung verschiedener Objektive* (vgl. Abbildung 17) aufgrund ihrer vielen Freiheitsgrade relativ kompliziert und bietet verschiedene Lösungsmöglichkeiten, die nicht einfach abzuschätzen sind. Deshalb werden im Folgenden anhand einer morphologischen Analyse nach F. Zwicky³⁵ verschiedene Lösungsmöglichkeiten für die herausgearbeiteten einzelnen Teil- und Unterfunktionen aufgezeigt und analysiert (s. Tabelle 5). Dabei wird das grundlegende Prinzip in Kombination mit einem konkreten Lösungsvorschlag genannt. Diese werden evaluiert, wobei die Bewertung nach den folgenden vier Gesichtspunkten a, b, c, d anhand eines Punktesystems erfolgt.

a) Handhabbarkeit im Labor:

- Schnelle, einfache Bedienung möglich?
- Sind die Maße konform mit dem vorhandenen Equipment im Optiklabor?

b) Präzision und Wiederholgenauigkeit:

- Kann z. B. gewünschte Positionierung mit nötiger Genauigkeit erfolgen?
- Ist eine dauerhafte Fixierung/ Arretierung möglich?

c) Ausreichender Bewegungsspielraum/ Flexibilität:

- Bietet die Lösung die Möglichkeit variabel eingesetzt zu werden?

d) Fertigbarkeit:

- Ist eine einfache Konstruktion möglich?
- Gibt es Teile bereits als Produkte zu kaufen?
- Wie sind die preislichen Unterschiede?

Hierbei gilt: 5 = sehr gut, 0 = ungenügend. Die Punktevergabe pro Lösungsmöglichkeit für eine Unterfunktion erfolgt relativ zu allen anderen Lösungsmöglichkeiten dieser Unterfunktion, da eine absolute Angabe nicht möglich ist.

Tabelle 5| Morphologisch Analyse der Einheit zur Halterung verschiedener Objektive und Teleskope. Die fettgedruckten Lösungsmöglichkeiten haben die höchste Punktzahl erhalten und sind die endgültigen Lösungen.

Morphologische Analyse der Halterung und Positionierung diverser Objektive/ Teleskope (O/T)			Lösungsmöglichkeiten															
			I				II				III				IV			
			Bewertungspunkte															
TF	UF	Bezeichnung	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	1.1 1.2	reversible Halterung parallel zur optischen Bank	Formschluss (über intrinsischen Anschluss, z. B. Objektivgewinde)				Formschluss (3-Punkt- klemmung)				Formschluss (Schelle)				Formschluss (2-Punktauflage/ V-Keil)			
			5	5	1	0	3	4	5	4	4	4	1	4	5	4	2	4
2	2.1 2.2	Translation in x-Richtung	manuell positionieren				Linearantrieb (manueller Lineartisch mit Feingewinde)				Linearantrieb (Piezolineartisch)							
			5	3	5	5	3	4	4	2	3	5	2	0				
	2.3	Fixierung	Kraftschluss (Verschraubung mit Grundplatte des Gimbal)				Formschluss (Einschieben/ Klemmen mit Anschlag)											
			5	5	3	5	5	5	5	5								
	2.4 2.5	Translation in y-Richtung (Höhe der opt. Achse erreichen)	Linearantrieb (Piezolineartisch)				Linearantrieb (Hubtisch mit Parallelogramm- Hubtechnik)				Linearantrieb (manueller Lineartisch mit Feingewinde)				Linearantrieb (Kombination mit TF1 – 3-Punkt- klemmung)			
			3	5	2	0	3	4	3	2	3	4	4	2	4	4	5	4
	2.6	Fixierung	Kraftschluss (Festklemmen mit Schrauben)				Selbsthemmung (von Schraub- gewinden)											
			5	5	4	4	5	5	5	5								
	2.7 2.8	Translation in z-Richtung	manuell positionieren				Linearantrieb (manueller Lineartisch mit Feingewinde)				Linearantrieb (Piezolineartisch)							
			5	3	5	5	3	4	4	2	3	5	2	0				
	2.9	Fixierung	Kombination mit 2.3															
			-	-	-	-												
3		Zusammenfügen der TF 2 und 3	Kraftschluss (Verschraubung)				Formschluss (Einfügen in Passungen)											
			5	5	5	5	5	3	5	5								

Da es für die benötigte Halterung keine Einzelsysteme gibt, welche die nötige Flexibilität zur Aufnahme verschiedenster Objektive bietet, wird der Halter selbst konstruiert.

Dem Bewertungsraster (vgl. Tabelle 5) mit den meisten Punkten folgend ergibt sich eine Dreipunktklemmung, in die Objektive mit verschiedenen Durchmessern eingefügt werden können. Um längere und schwere Objektive zu fixieren, werden zwei baugleiche Halter angefertigt, welche bei Bedarf kombiniert werden können (vgl. Abbildung 21).

Als Basis für den Halter dient eine sogenannte *Zeiss*-Schiene, die manuell positioniert werden soll. Die Fixierung erfolgt per Klemmung mittels Adapterstücke, die auf der Grundplatte festgeschraubt werden können.

Generell wird auf den Einsatz von elektronischen Teilen zur Positionierung verzichtet, da die Objektive nur selten gewechselt werden und somit eine manuelle Justierung günstiger und ausreichend ist.

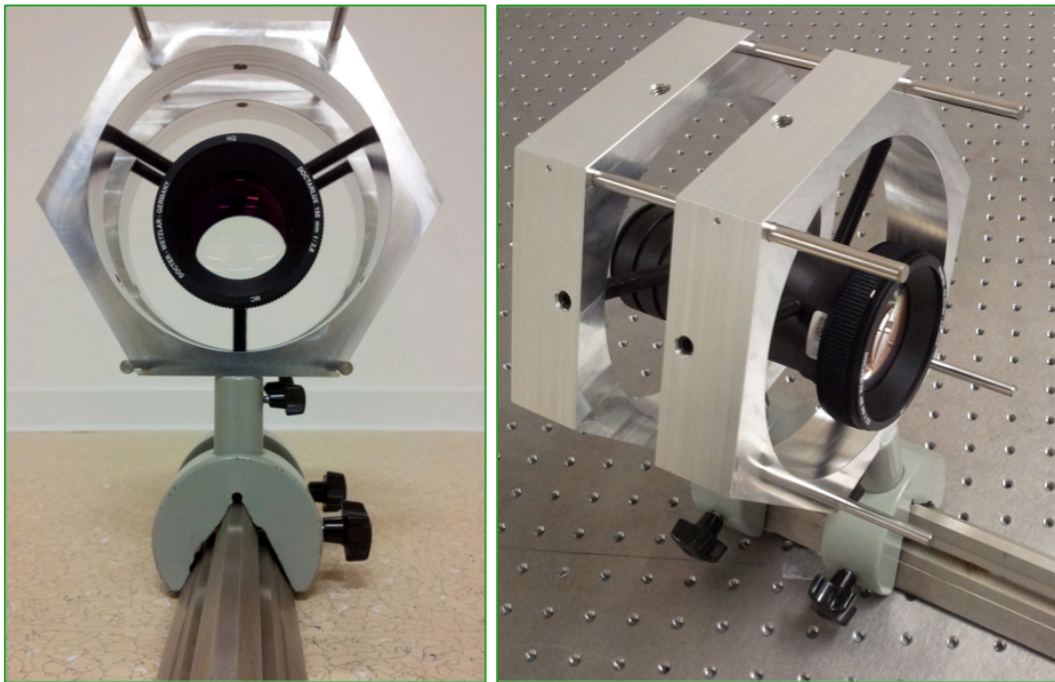


Abbildung 21| Halterung für Objektive und Teleskope. Über die schwarzen Gewindeschrauben können verschiedene Teleskope und Objektive unabhängig vom Durchmesser auf der optische Achse positioniert werden.

3.2.4 Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt wird der Versuchsaufbau sämtlicher Komponenten beschrieben. Da das Optiklabor für mehrere Versuche genutzt wird, werden alle benötigten Teile zusammen auf einer separaten optischen Montageplatte kombiniert, die auf die Arbeitsplatte des *Gimbal* aufgeschraubt wird. So kann der Versuchsaufbau schnell entfernt werden ohne eine aufwendige Neujustierung nötig zu machen.

- **Ausrichtung der Halterung für Objektive und Teleskope:**

Die *Zeiss*-schiene wird manuell mit Hilfe eines Maßstabes parallel zur optischen Achse ausgerichtet und befestigt. Das gewünschte Objektiv wird zentral positioniert und mittels Verschraubung fixiert. Zur Feinjustierung des Objektivs wird in den Kollimator ein *Target* eingesetzt (Siemensstern), der auf eine Mattscheibe in der bildseitigen Brennebene des Objektivs projiziert wird. Anhand dieser Abbildung kann mit Hilfe der Schrauben, die das Objektiv halten, eine visuelle Feinabstimmung vorgenommen werden.

- **Ausrichtung der Elemente der Detektoreinheit:**

Zuerst werden die optischen Elemente (Linse, Strahlteiler und Kameras) der Detektoreinheit auf den Schienen des *LINOS Mikrobanksystems* auf einer optischen Montageplatte positioniert. Dafür wird an den Punkt, an dem später das Bild des Kollimator-Objektiv-Systems entsteht, ein *Target* (Fadenkreuz) eingefügt. Anhand des Bildes des *Targets* auf den einzelnen Kameras erfolgt die translatorische sowie rotatorische Justierung der Elemente.

- **Ausrichtung Detektoreinheit zum Teleskop/ Objektiv:**

Die eingerichtete Detektoreinheit wird über Adapterplatten mit dem Manipulator (Hexapod) verbunden, welcher wiederum mit der Basis (optische Montageplatte) verbunden wird. Der Hexapod wird so bewegt und ausgerichtet, dass die Kameras ein gleichmäßiges und scharfes Bild des im Kollimator befindlichen *Targets* (Siemensstern) sehen.

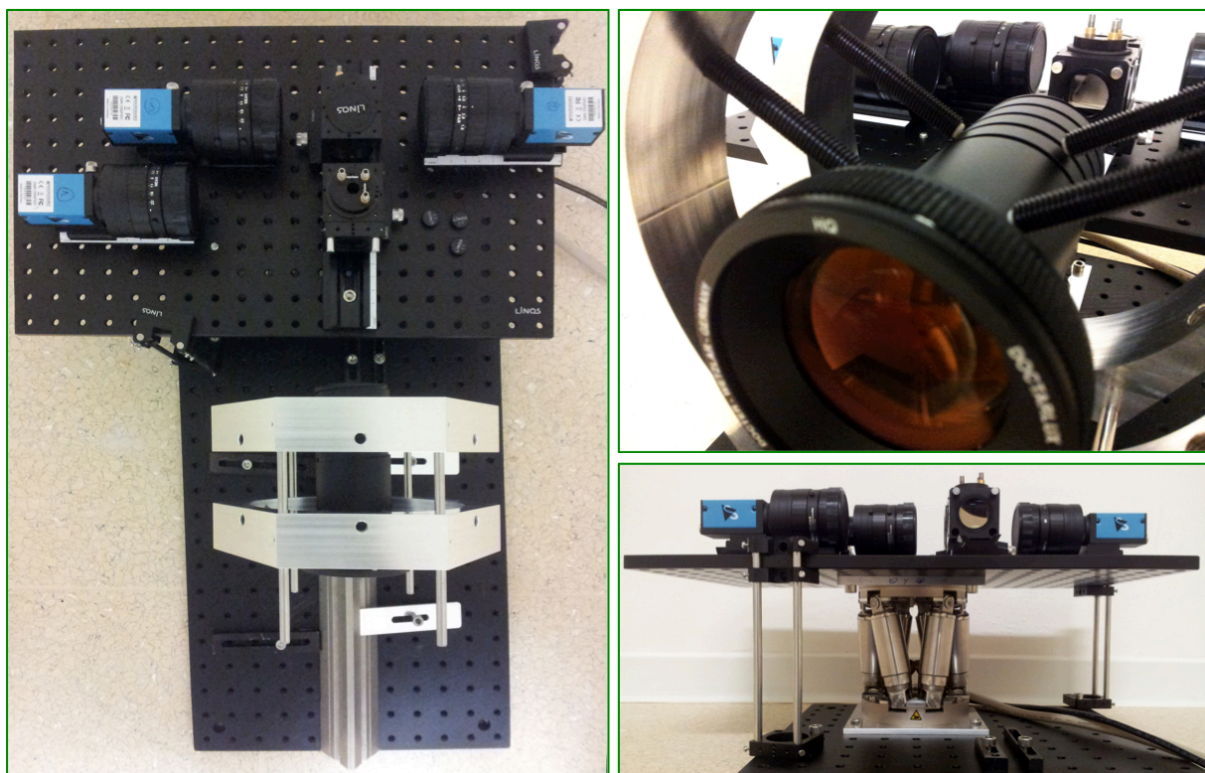


Abbildung 22| Aufbau des Gesamtsystems. Rechts unten ist der Manipulator (Hexapod) zu sehen.

3.3 Konzipierung des elektronischen Designs

Die Elektronik dient der Detektion und Kompensation einer eingestellten Defokussierung (vgl. Abbildung 23). Sie soll folgende Funktionen erfüllen:

- Nebensensoren und den Hauptsensor überwachen.
- Aus den Bildern der Nebensensoren Informationen über die Fokuslage gewinnen.
- Informationen in die notwendige Bewegung zur Refokussierung umrechnen.
- Mit diesen Werten den Manipulator zur Refokussierung ansteuern.
- Überprüfen, ob sich die Detektorebene im Fokus befindet.

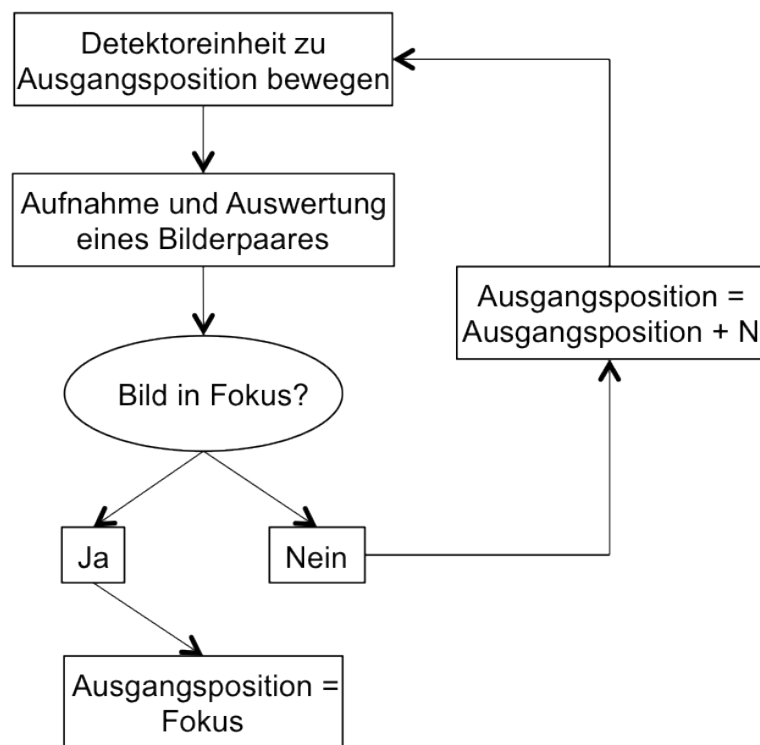


Abbildung 23 | Regelkreis zur Darstellung der Funktion der Elektronikkomponenten.

Für diese Aufgabe sind folgende Komponenten nötig (vgl. Abbildung 24), wobei der PC zur Auswertung und Ansteuerung das Herzstück bildet:

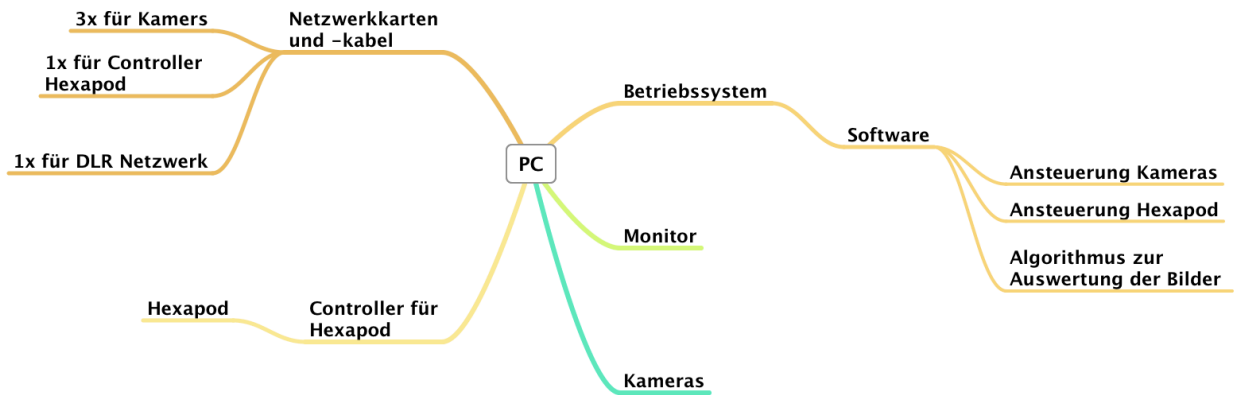


Abbildung 24| Aufschlüsselung aller benötigten Komponenten zur elektronischen Auswertung und Ansteuerung.

Sämtliche Bestandteile, abgesehen von Kameras und Software, sind Standardteile und bedürfen keiner weiteren Erläuterung. Die Programmierung der Software wird von G. M. Müller-Rowold⁶ übernommen. Die Kameras müssen spezielle Anforderungen erfüllen:

- Kompakte Bauweise (auch der Objektive), um Höhe der optischen Achse nicht zu überschreiten.
- Geringe Pixelgröße für hohes Auflösungsvermögen und somit exakte Bestimmung der Defokussierung.
- Gewindebohrungen zum Anschluss an *LINOS Mikrobanksystem* müssen vorhanden sein.
- Integrationszeit vorerst irrelevant, da unter Laborbedingungen längere Belichtungszeiten möglich sind.

Die Wahl fiel auf *The Imaging Source "23" Series GigE Camera* mit einer Pixelgröße von $2,2\ \mu\text{m} \times 2,2\ \mu\text{m}$ und einer Auflösung von 2592×1944 Pixel bei einem Sensorformat von $1/2,5''$, welche die oben genannten Anforderungen erfüllen. Dazu passend werden *Fujinon HF50SA-1* Objektive verwendet, welche bei der genannten Formatgröße einen Bildwinkel größer ($H \times B = 5^\circ 30' \times 4^\circ 07'$) haben.

4 Experimente

Dieses Kapitel behandelt in zwei Teilen die durchgeführten Experimente:

Im ersten Abschnitt werden grundlegende Messungen vorgenommen, die das Verhalten des *ARMES* bezüglich der Änderung der Gegenstandsweite und verschiedener *Targets* charakterisieren. Hierfür wird die Detektoreinheit in äquidistanten Schritten bewegt, um Daten für die später nötige Ausgleichsbewegung zu gewinnen (vgl. Abbildung 25 b).

Darauf aufbauend werden im zweiten Versuchsteil verschiedene *Targets* per Kollimator defokussiert, um eine Simulation verschiedener Gegenstandsweiten zu ermöglichen (vgl. Abbildung 25 c).

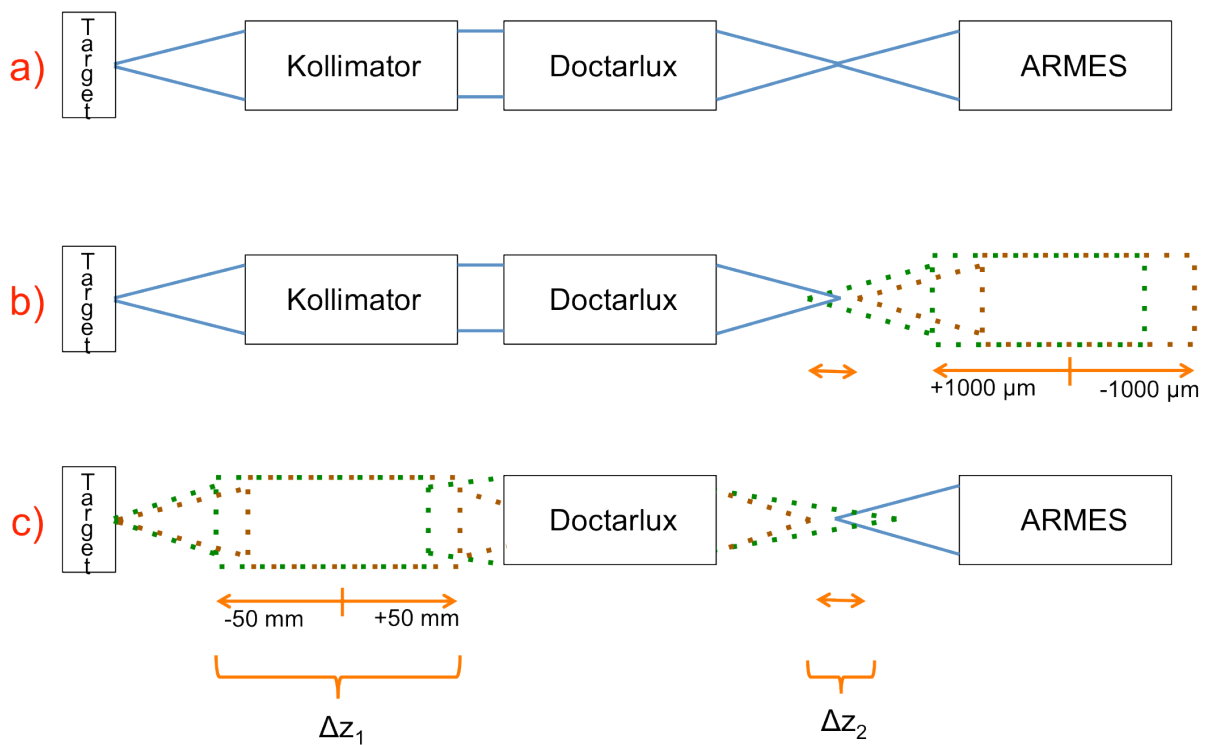


Abbildung 25| Schematischer Ablauf der Versuche. a) Ausgangssituation: Die Gegenstandsebene des *ARMES* ist gleich der Bildebene des Kollimator–Doctarlux–Aufbaus. Das System ist fokussiert. b) Bewegung der Detektoreinheit. c) Defokussierung der *Targets* per Kollimator.

Da die Ergebnisse der ersten Versuche zwingend notwendig sind für die Ausführung der zweiten, werden sie direkt in diesem Abschnitt ausgewertet und diskutiert.

4.1 Bestimmung der Ausgleichsgeraden

Um das Verhältnis von per Kreuzkorrelation berechnetem Pixelshift und Hexapodbewegung zu ermitteln, wird in den folgenden Versuchen der *ARMES*-Aufbau in äquidistanten Schritten vor feststehenden Projektionen von *Targets* auf der optischen Achse vor- und zurückbewegt (vgl. Abbildung 25 b). Da dieser Vorgang dem Verschieben des *Targets* selbst entspricht (Änderung der Gegenstandsweite des *ARMES*), kann aus der messbaren Pixelverschiebung auf den Detektoren ein Verhältnis

$$V = \frac{\text{Pixelverschiebung}}{\text{Gegenstandsweitenänderung}}$$

errechnet werden. Dieses Verhältnis ist später die Grundlage, um aus einer detektierten Pixelverschiebung bei sich ändernder Gegenstandsweite die nötige Refokussierstrecke für das *ARMES* zu berechnen. Die Bewegung erfolgt dabei in Schritten zu je 50 µm über eine Gesamtdistanz von 2000 µm, wobei das *ARMES* 3 x von -1000 µm ... +1000 µm und 3 x in die Gegenrichtung von +1000 µm ... -1000 µm bewegt wurde.

Die Distanz von ± 1000 µm wurde gewählt, weil sie der Länge Δz_2 (vgl. Abbildung 25 c) entspricht, die sich die Bildebene des Kollimators (entspricht späterer Gegenstandsebene des *ARMES*) bei maximaler Defokussierung des Kollimators bewegt. Für eine statistische Auswertung und zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit wurden an jedem Messpunkt insgesamt 10 Bildpaare aufgenommen und jeweils kreuzkorreliert, sodass letztlich 60 Datensätze pro Position für die Bildung von Mittelwert und Standardabweichung zur Verfügung stehen.

Für die nachfolgenden Versuche werden drei verschiedene, von hinten durchleuchtete *Targets* untersucht, um Aufschluss darüber zu erhalten, wie sich verschiedene Motive (und damit Ortsfrequenzen) auf die Bestimmung der Pixelverschiebung per Kreuzkorrelation auswirken. Als *Targets* wurden eine schräge Kante (sog. „*Slanted Edge*“), ein Siemensstern, und ein Dia mit einer Aufnahme eines Raumes mit verschiedenen Objekten benutzt, um eine Vielzahl von diversen, unterschiedlich angeordneten Ortsfrequenzen bewerten zu können (s. Abbildung 26).

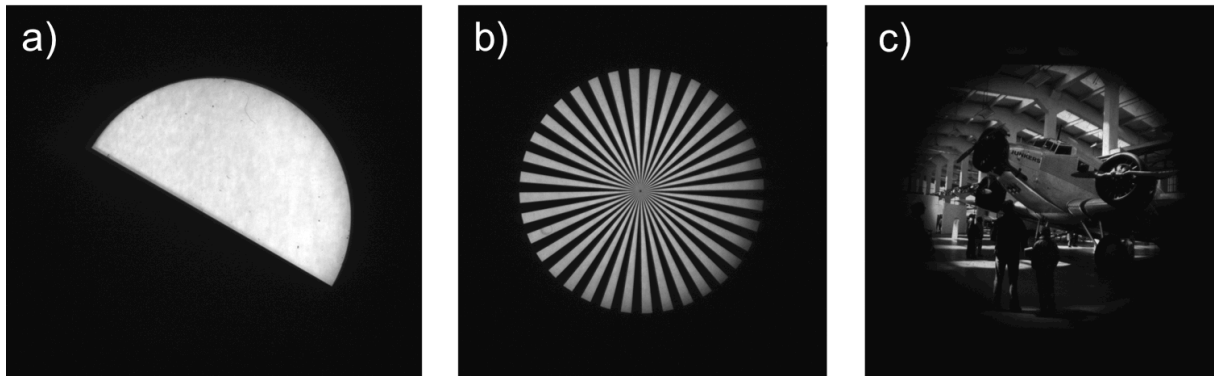
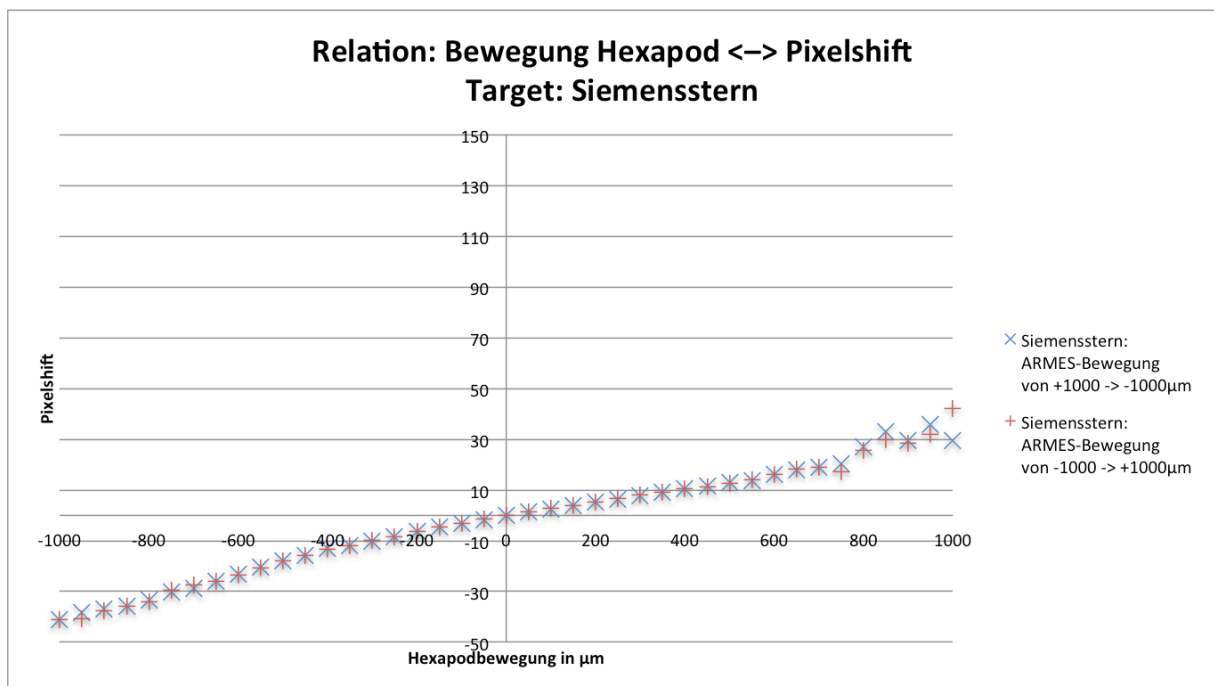


Abbildung 26 | Abbildungen der drei *Targets*. a) *Slanted Edge*, b) Siemensstern, c) Dia. Der Kontrast der Abbildungen wurde für die hiesige Darstellung optimiert, um die Erkennbarkeit zu fördern. Für die Auswertung der Experimente wurden keinerlei Bildoptimierungen durchgeführt.

4.1.1 Abhängigkeit der *Pixelshiftbestimmung per Kreuzkorrelation* von der Bewegungsrichtung des Manipulators

Bei den ersten Experimenten wird untersucht, wie sich die Bewegungsrichtung des Hexapods auf die Wiederholgenauigkeit der Messungen auswirkt. Dafür werden, wie oben beschrieben, 3 Messungen von $-1000\ \mu\text{m} \dots +1000\ \mu\text{m}$ und 3 Messungen in Gegenrichtung durchgeführt (vgl. Abbildung 27).



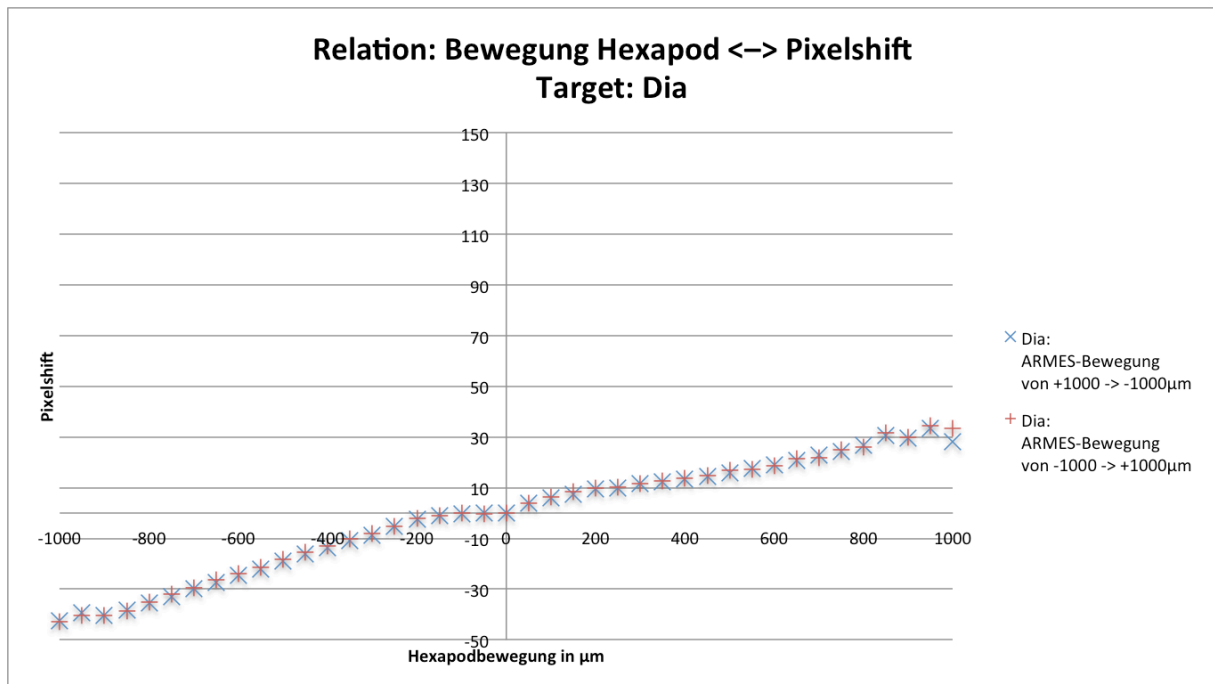
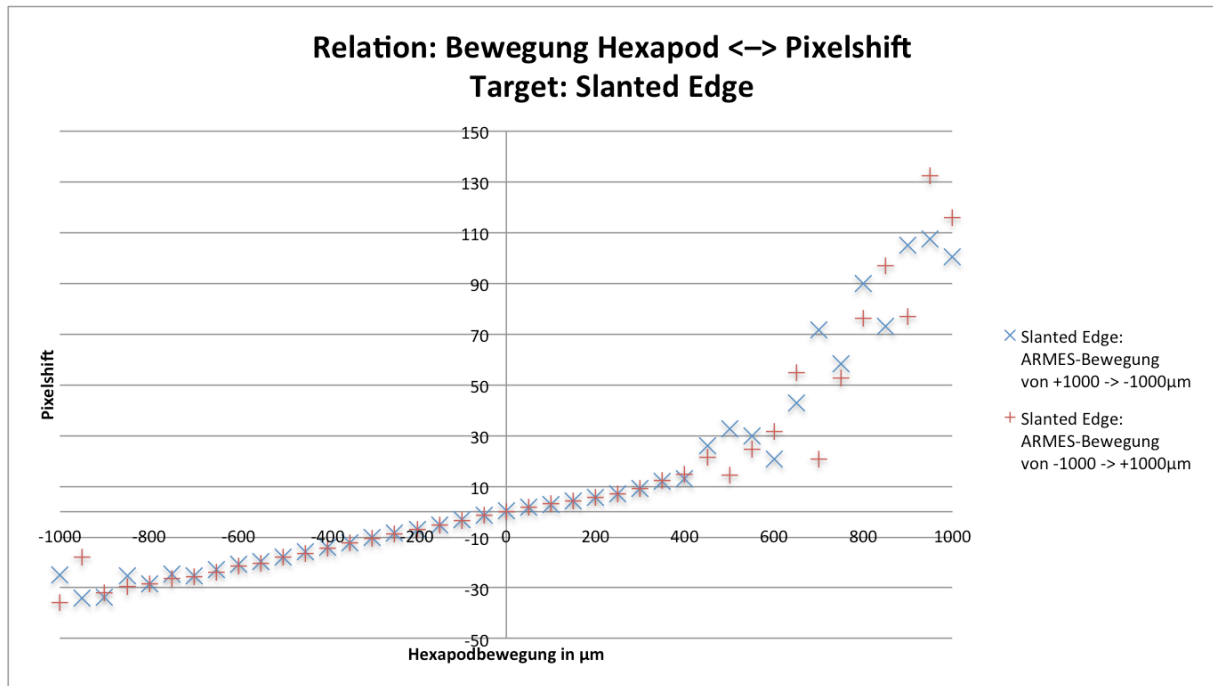
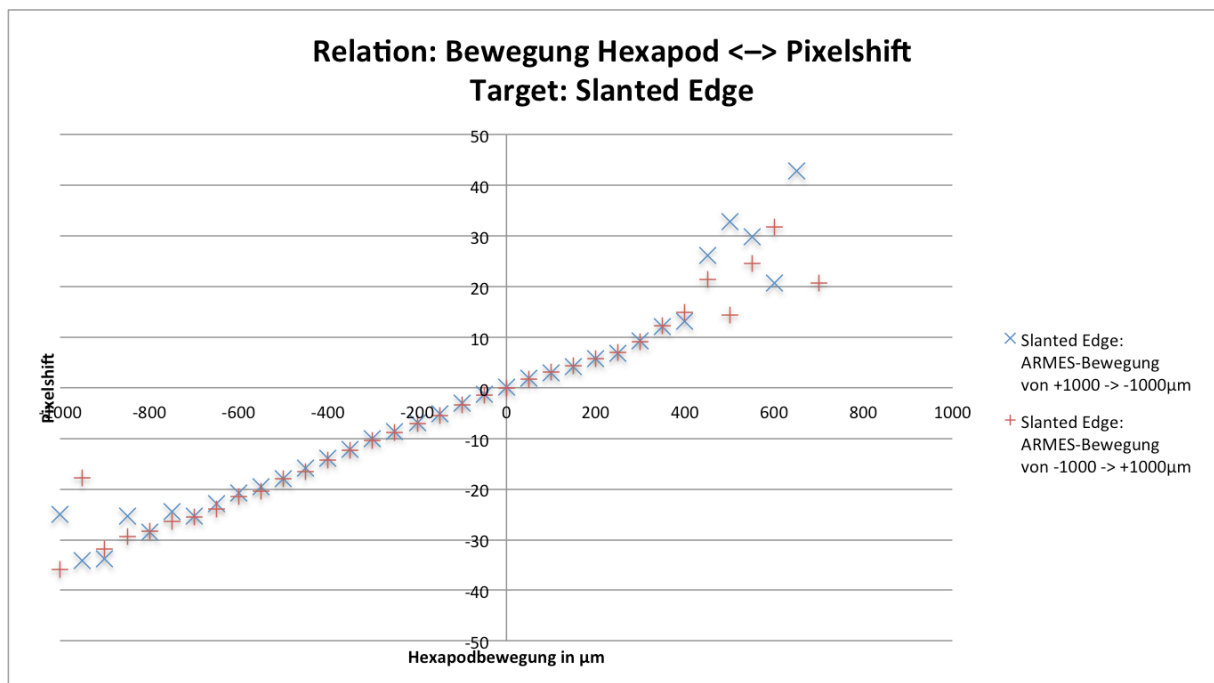
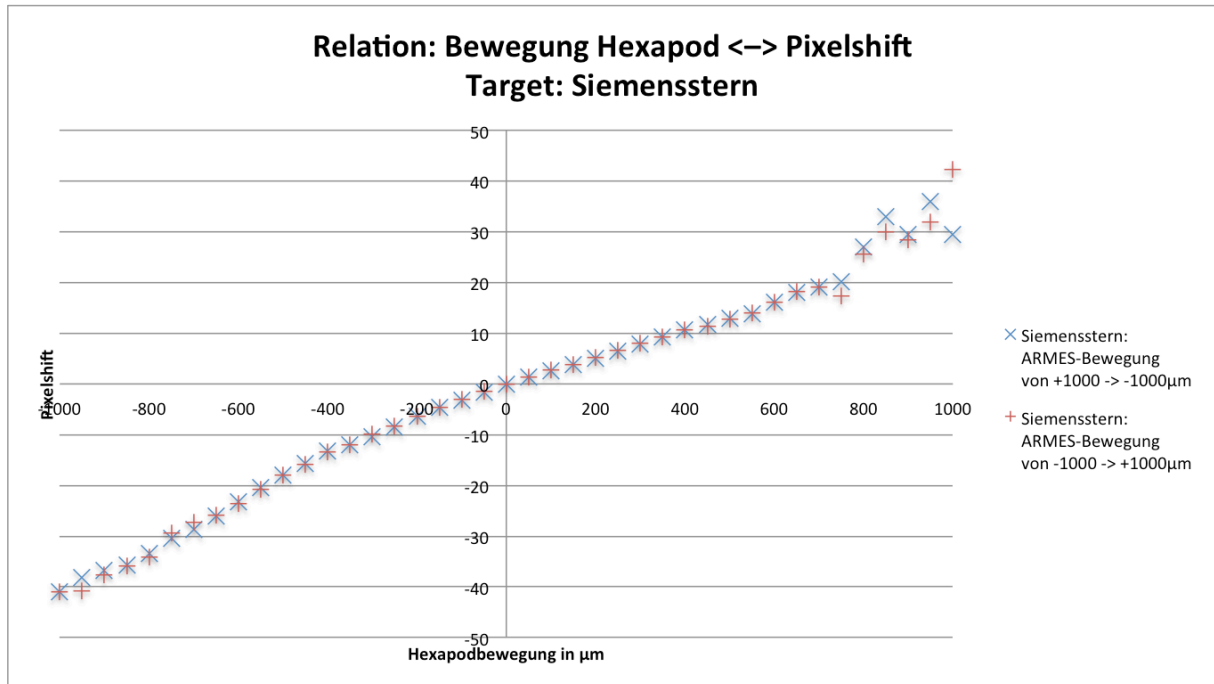


Abbildung 27| Drei Darstellungen der Abhängigkeit des *Pixelshifts* von der Bewegung und der Bewegungsrichtung des Manipulators.

Eine kurze Diskussion folgt am Ende des nächsten Abschnitts 4.1.1.1.

4.1.1.1 Ausschnittvergrößerung

Der besseren Erkennbarkeit wegen sind die oben gezeigten Diagramme hier in einer vergrößerten Darstellung zu sehen.



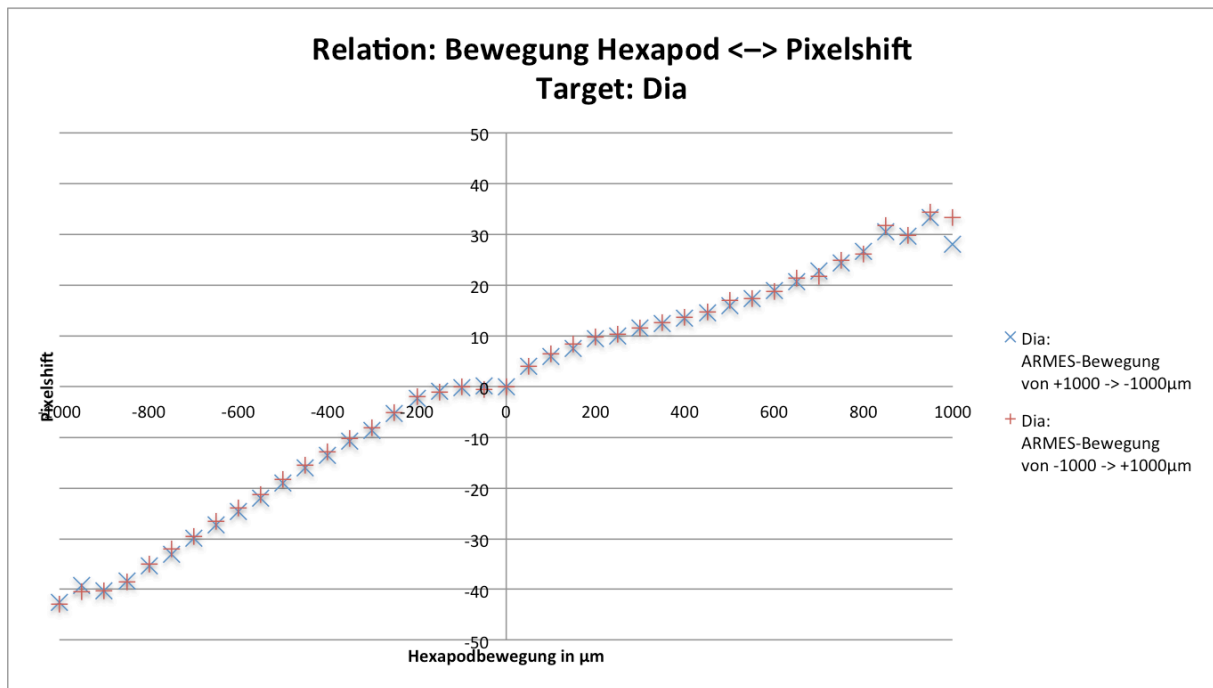
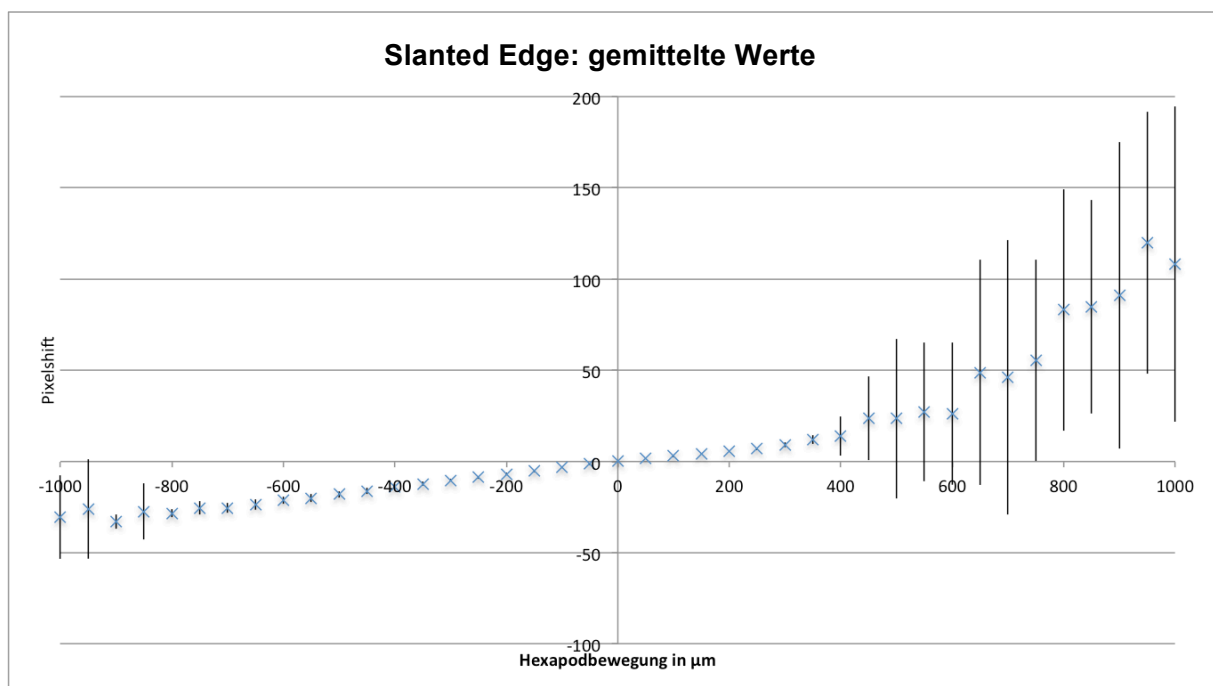
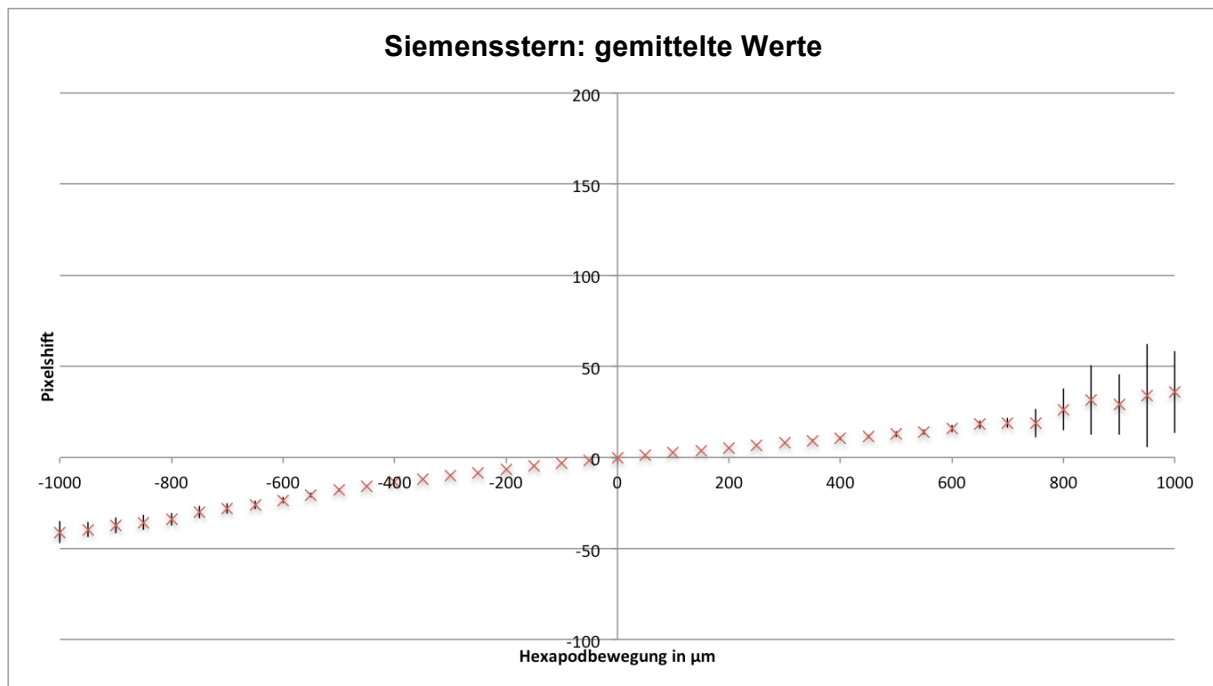


Abbildung 28| Drei Detailvergrößerung der Abbildungen 27 zur besseren Erkennbarkeit.

Es ist zu erkennen (s. insbesondere Abbildung 28), dass es keine hystereseebedingten, systematischen Abweichungen gibt, der Hexapod also mit einer sehr guten Wiederholgenauigkeit arbeitet. Die Störungen bei Siemensstern und *Slanted Edge* im jeweils I. Quadranten haben eine andere Ursache, die in der Auswertung erläutert wird.

4.1.2 Betrachtung der Mittelwerte und Standardabweichung aus Vor- und Zurückbewegung des Manipulators

Im Folgenden werden *Target*-spezifische Mittelwerte und deren Standardabweichungen dargestellt. Da in den Versuchsreihen aus Abschnitt 4.1.1 keine systematische richtungsabhängige Abweichung festgestellt wurde, werden hierzu sämtliche 60 Messungen, die pro Position durchgeführt wurden, gemittelt, unabhängig davon, ob sie zu den Messungen von $[-1000 \dots +1000 \mu\text{m}]$, oder $[+1000 \mu\text{m} \dots -1000 \mu\text{m}]$ gehören.



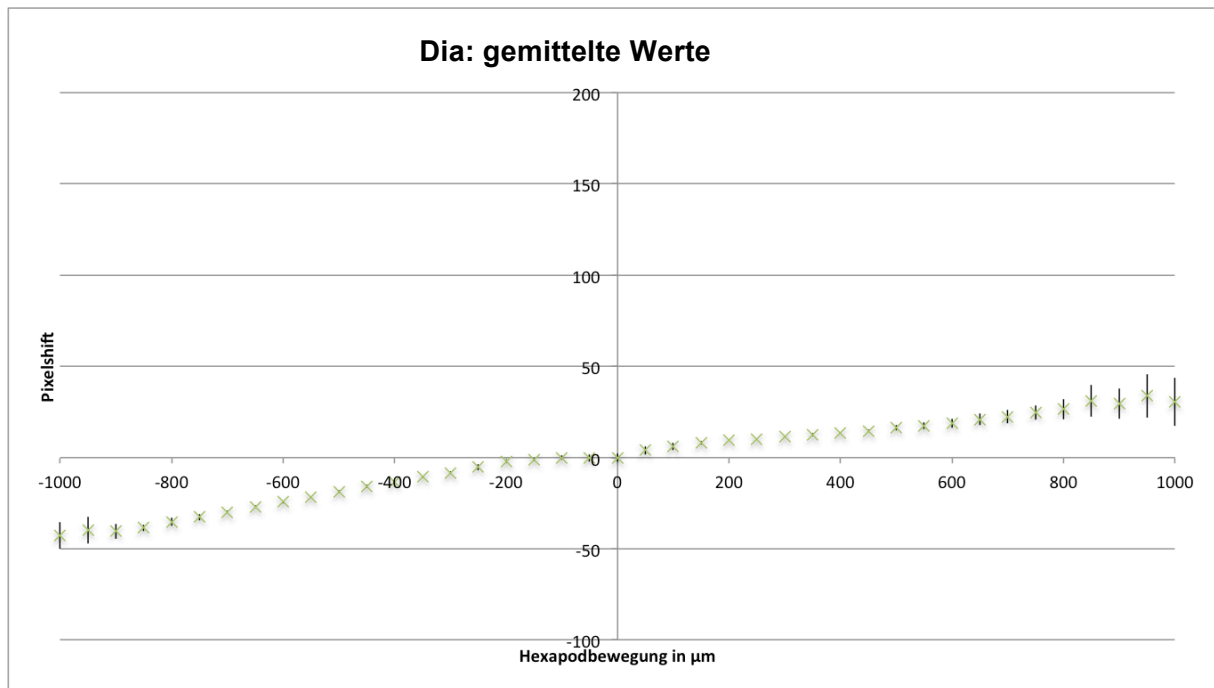


Abbildung 29| Mittelwerte und Standardabweichungen der kombinierten Werte aus beiden Bewegungsrichtungen des Manipulators.

Es ist zu erkennen, dass insbesondere die *Slanted Edge* eine große Standardabweichung im rechten Arm zeigt. Dies wird in den nächsten Abbildungen noch verdeutlicht. Eine Diskussion hierzu erfolgt im Kapitel *Auswertung*.

4.1.3 Vergleich der Standardabweichungen aller drei *Targets*

Für die Vergleichbarkeit der Abweichungen der Messungen bei allen angefahrenen Positionen werden im Folgenden nur die *Targetspezifischen* Standardabweichungen gezeigt.

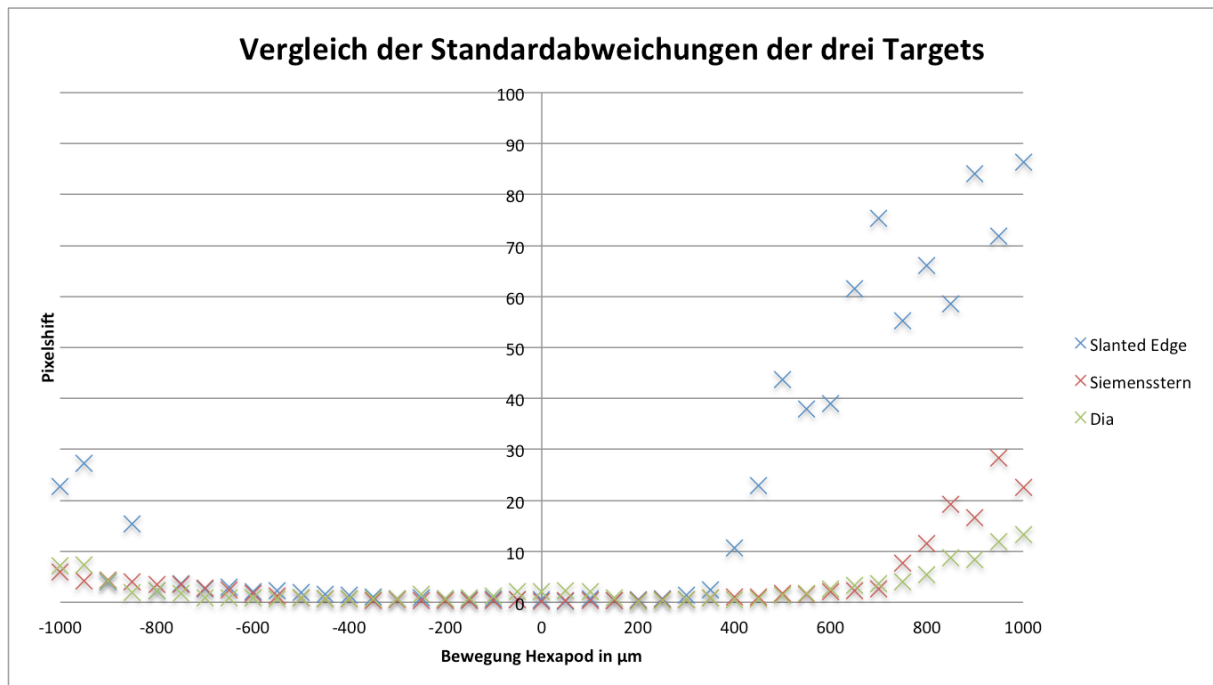


Abbildung 30| Vergleich der Standardabweichungen aller drei *Targets*.

4.1.3.1 Ausschnittvergrößerung

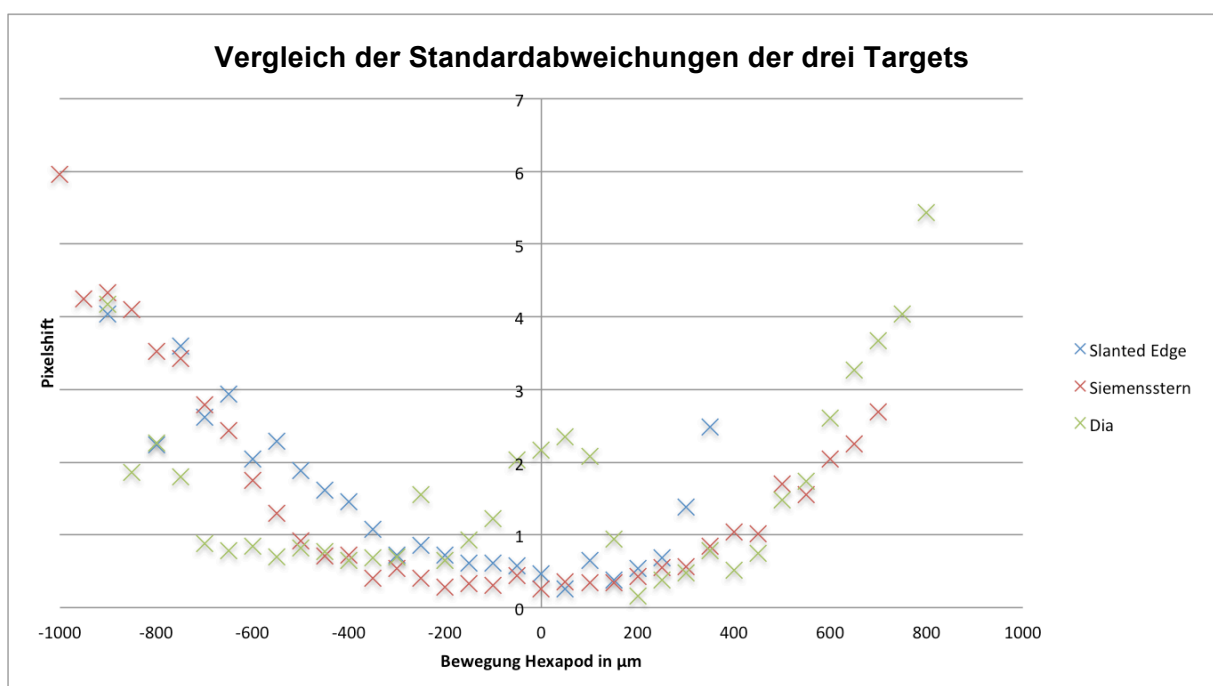


Abbildung 31| Detailvergrößerung der Abbildung 30 zur besseren Erkennbarkeit.

Generell ist die Standardabweichung nahe des Nullpunktes für ca. die Hälfte der gemessenen Strecke relativ gering. Es gibt drei Auffälligkeiten:

1. Siemensstern und insbesondere *Slanted Edge* zeigen – korrespondierend zu den Ergebnissen aus 4.1.1 und 4.1.1.1 – eine verstärkte Abweichung im rechten Arm des Diagramms.
2. In der Ausschnittvergrößerung der Standardabweichung (4.1.3.1) ist zu erkennen, dass das Dia um den Nullpunkt, also die Fokusposition, eine verstärkte Abweichung zeigt.
3. Je weiter sich das *ARMES* von der In-Fokus-Position entfernt, desto größer wird die Standardabweichung.

4.1.4 Vergleich der Mittelwerte aller drei *Targets*

Während in Abschnitt 4.1.3.(1) die Standardabweichungen der drei *Targets* miteinander verglichen wurden, ist im Folgenden eine Gegenüberstellung ausschließlich der Mittelwerte zu sehen (Abbildung 32 und Abbildung 33).

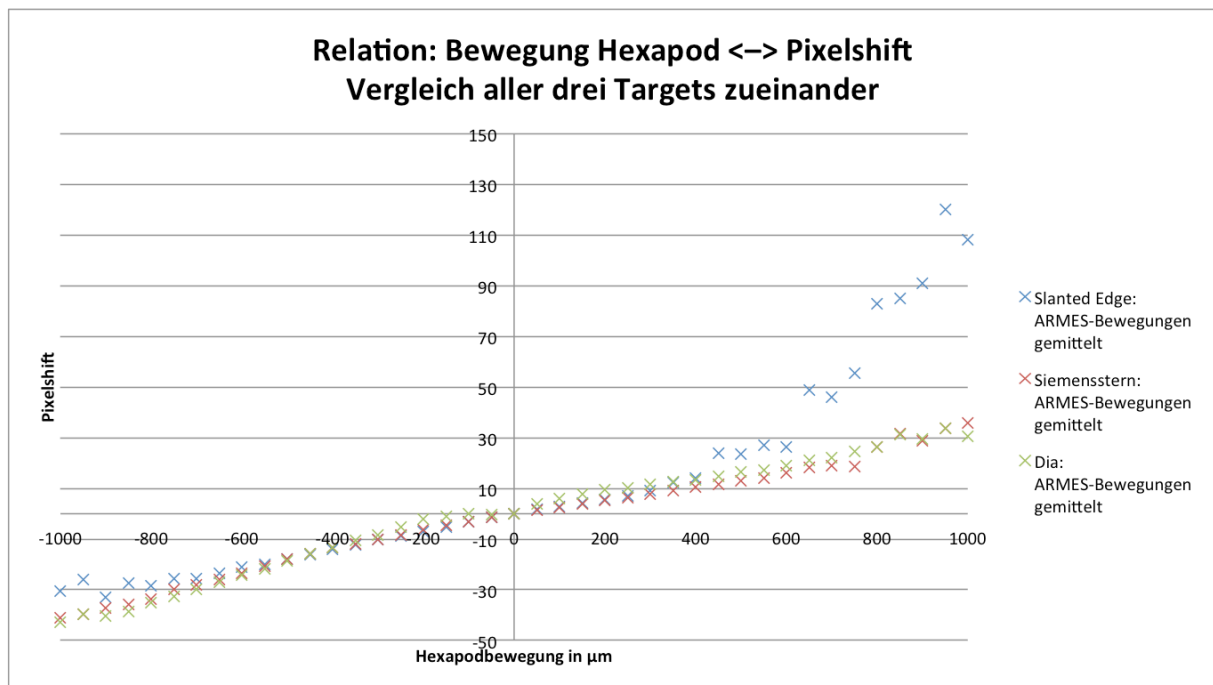


Abbildung 32 | Darstellung der Mittelwerte der drei verschiedenen *Targets*.

4.1.4.1 Ausschnittvergrößerung

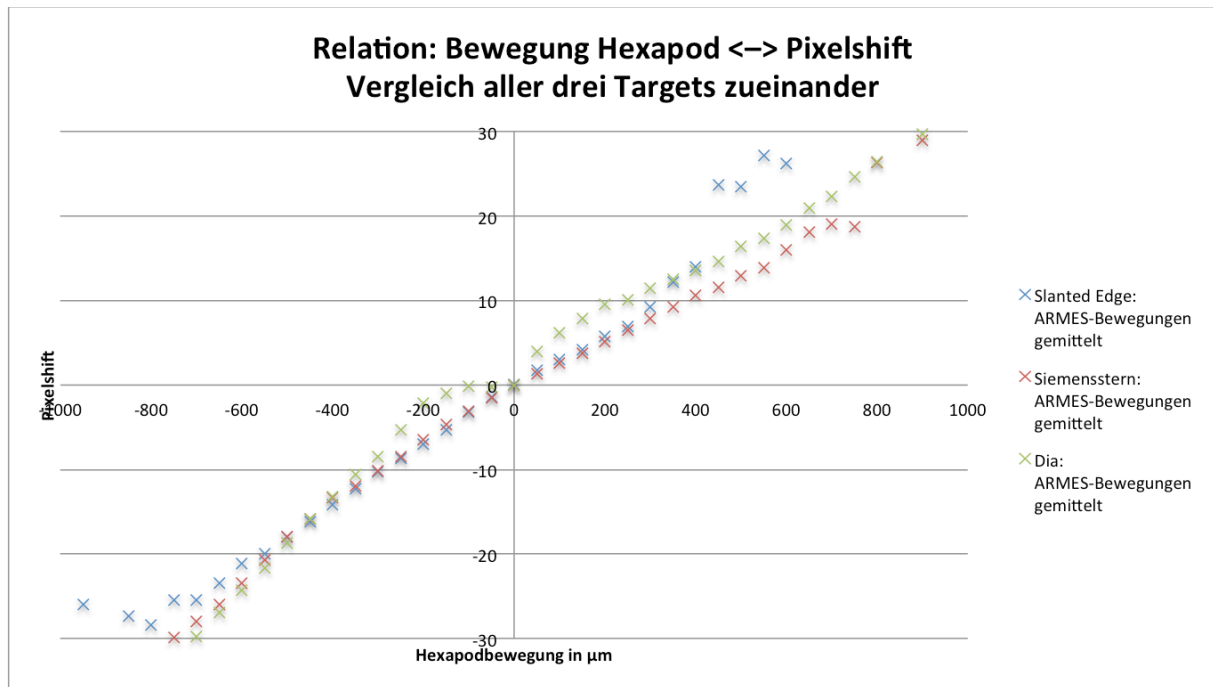


Abbildung 33| Detailvergrößerung der Abbildung 32 zur besseren Erkennbarkeit.

Es ist zu erkennen, dass sich die drei *Targets* innerhalb systemischer Grenzen sehr ähnlich verhalten. Bis auf die eben besprochene Tatsache, dass es insbesondere beim *Slanted Edge* an den Rändern zu extremen Schwankungen kommt, haben Siemensstern und *Slanted Edge* fast den gleichen Verlauf.

Davon abweichend verhält sich das Dia. Dieses hat zwar prinzipiell einen ähnlichen Anstieg wie die beiden anderen *Targets*, zeigt aber auf einem Großteil des Graphen einen positiven Offset zu diesen. Dies könnte damit zu begründen sein, dass es nicht möglich war, das Dia perfekt plan in den Halter zu integrieren, sodass es leicht wellig ist. Dies könnte sich als leichter, durchgängiger Offset, der durch die Kreuzkorrelation berechnet wird, bemerkbar machen.

4.1.5 Bestimmung der Target-abhängigen Ausgleichsgeraden (einteilige AG)

In diesem Teil der Auswertung (vgl. Abbildung 34 und Abbildung 35) soll die Ausgleichsgerade bestimmt werden, die das Verhältnis $\frac{\text{ARMES-Bewegung}}{\text{Pixelshift}}$ wiedergibt und mit Hilfe derer in den späteren Experimenten die nötige zu fahrende Strecke für eine Refokussierung berechnet wird. Um sichere Ergebnisse zu erhalten, werden ausschließlich Werte genutzt, die eine Standardabweichung kleiner 3 Pixel aufweisen. Die Ausgleichsgeraden aus allen Mittelwerten zu bilden, erscheint angesichts der Tatsache, dass sie an den Rändern so starken Schwankungen

unterworfen ist, nicht sinnvoll. Diese Werte würden bei der späteren Refokussierung die zu berechnenden Werte, insbesondere in der Nähe des Nullpunktes, stark verfälschen.

Da in den später folgenden De- und Refokussierungsversuchen die *Slanted Edge* aufgrund oben besprochener Problematik nicht genutzt wird, wird für sie auch keine Ausgleichsgerade berechnet.

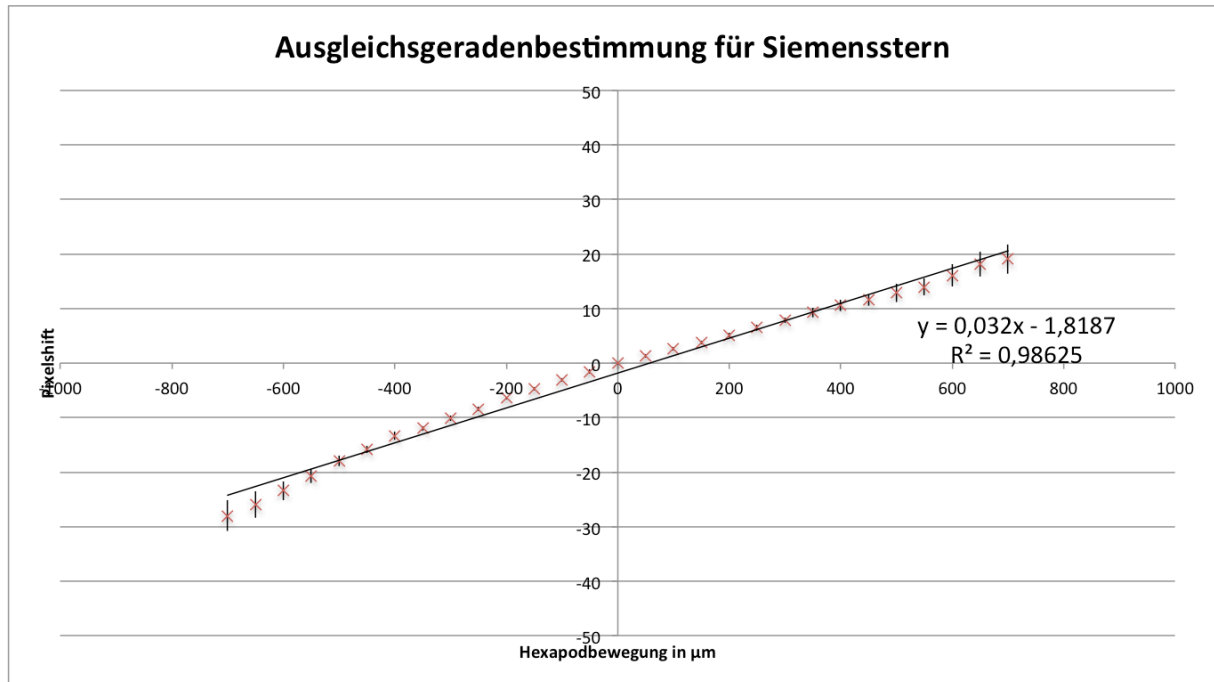


Abbildung 34| Einteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Siemenssterns.

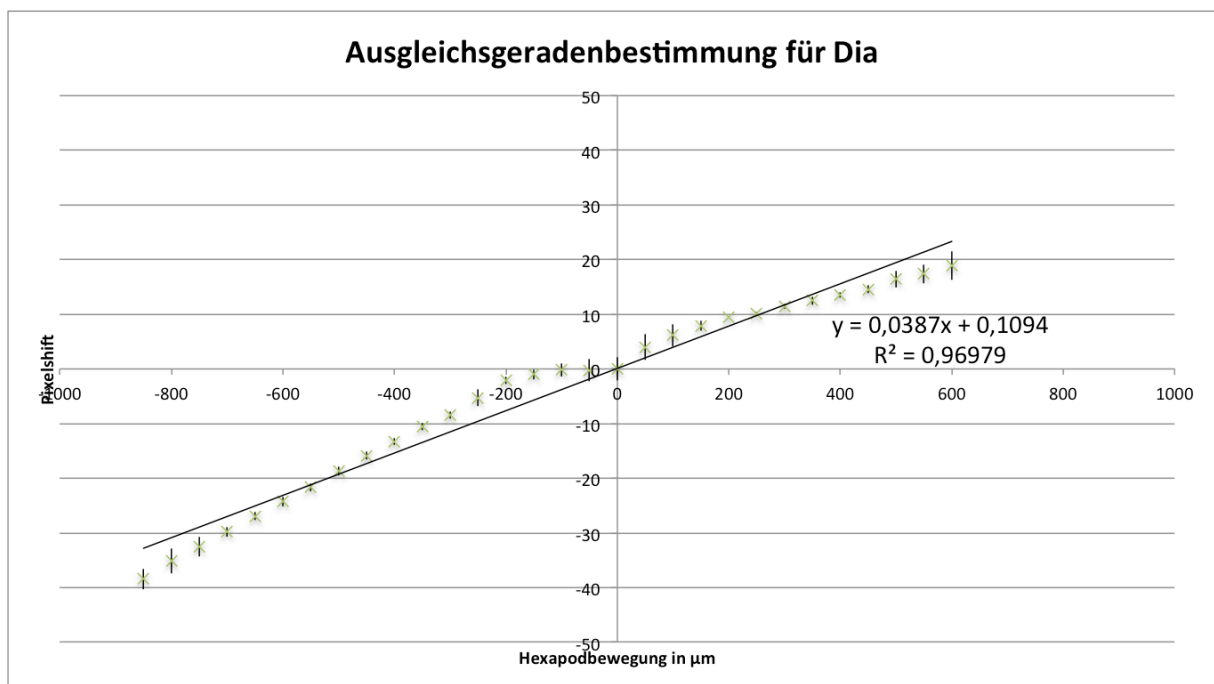


Abbildung 35| Einteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Dias.

In den Diagrammen sind neben der Ausgleichsgeraden auch deren Berechnungsvorschrift sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. Anhand letzterem ist zu erkennen, dass die Anpassung noch optimiert werden kann. Dies kann durch eine nicht lineare Ausgleichsgerade geschehen. Da diese jedoch in den folgenden Experimenten (bei denen mit Hilfe des Kollimators defokussiert werden soll – Kap. 4.2ff), aufgrund ihrer möglichen mehreren Nullstellen schwierig zu implementieren ist, wird vorerst versucht, mit einer zweigeteilten linearen Ausgleichsgeraden eine bessere Anpassung zu erreichen.

4.1.5.1 Bestimmung der *Target*-abhängigen Ausgleichsgeraden (zweigeteilte AG)

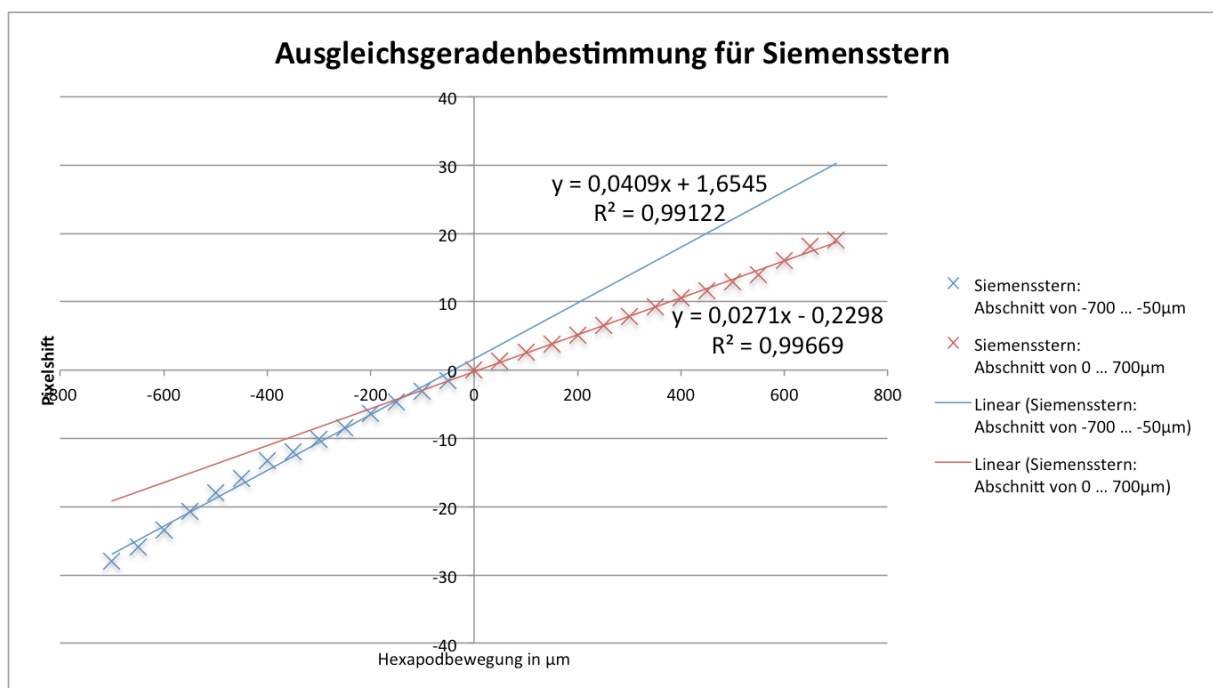


Abbildung 36 | Zweiteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Siemenssterns.

Durch den Vergleich der Ausgleichsgeraden für die Mittelwerte des Siemenssterns aus Abbildung 34 und Abbildung 36 lässt sich erkennen, dass eine verbesserte Anpassung von ca. 0,005 ... 0,01 erreicht werden konnte.

Beim Dia hingegen ist beim Vergleich von Abbildung 35 und Abbildung 37 für den rechten Arm keine verbesserte Anpassung durch die geteilte Ausgleichsgerade ersichtlich. Auf dem linken Arm immerhin um etwas mehr als 0,02. Durch eine Anpassung des Intervalls, in dem die jeweiligen Ausgleichsgeraden verlaufen, kann dies optimiert werden (vgl. Abbildung 38).

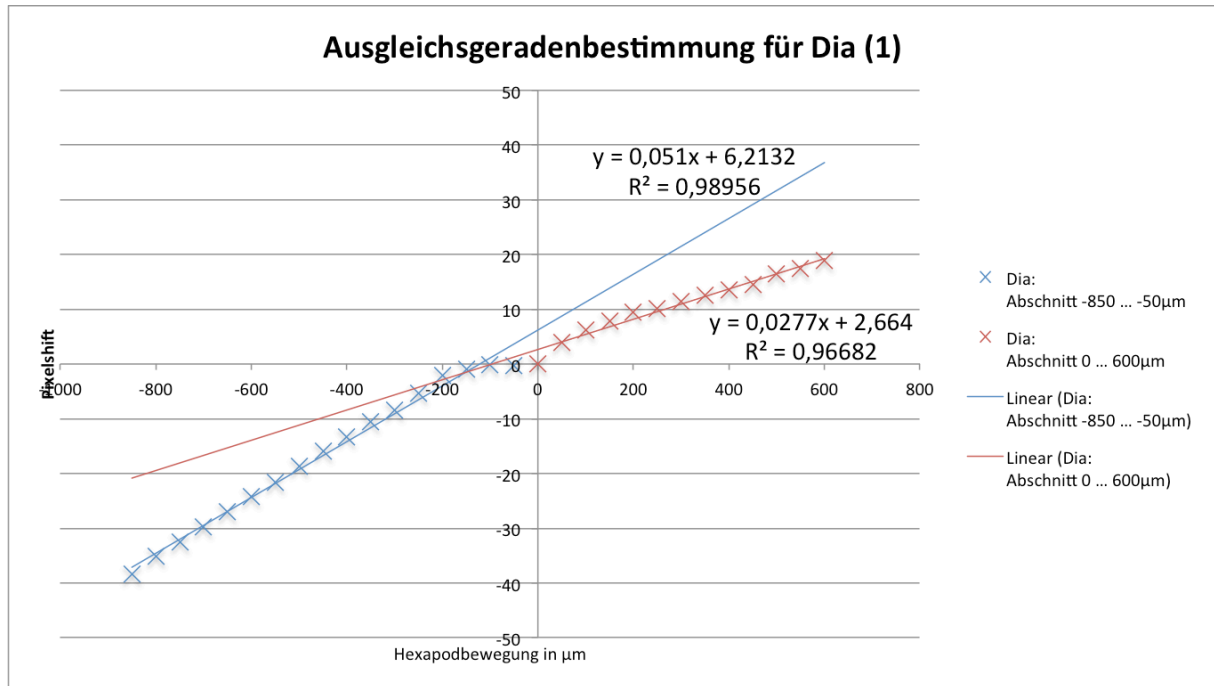


Abbildung 37 | Erster Ansatz für eine zweiteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Dias.

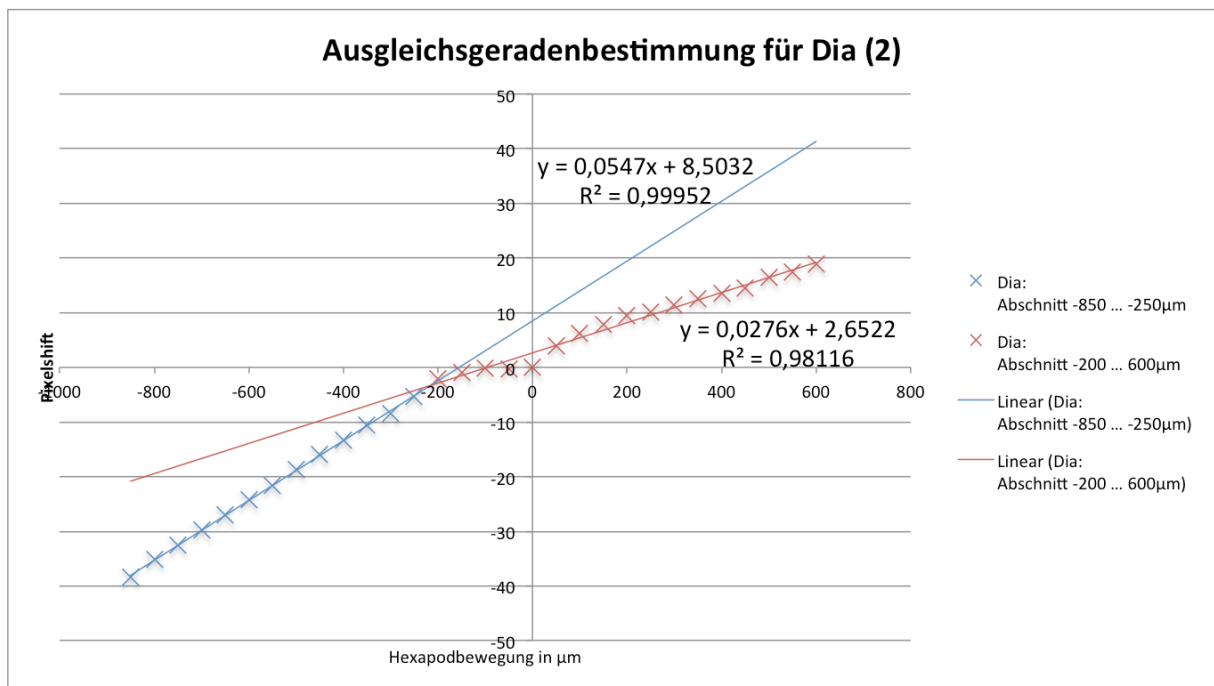


Abbildung 38 | Zweiter Ansatz für eine zweiteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Dias.

Das Bestimmtheitsmaß ist nun insgesamt um ca. 0,02 ... 0,035 im Vergleich zur einteiligen Ausgleichsgeraden angestiegen und zeigt insbesondere für den linken Arm der Messung nahezu ideale Werte ($R^2 > 0,9995$). Für die folgenden De- und Refokussierungsversuche wird diese Ausgleichsgeradenaufteilung verwendet werden.

4.2 De- und Refokussierungsexperimente

In den folgenden Experimenten wird zur Simulation des Ausschwenkens des Satelliten und damit einhergehender Gegenstandsweitenänderung eine Defokussierung per Kollimator eingestellt (vgl. Kap. 4, Abbildung 25 c). Die Verstellung wird durch den *ARMES*-Aufbau detektiert und mit Hilfe der in dem ersten Experiment (Kap. 4.1.5.1) gewonnenen Ausgleichsgeraden ausgeglichen. Die folgenden Versuche wurden mit dem Siemensstern und dem Dia durchgeführt. Das *Slanted-Edge-Target* scheidet wegen der schnell eintretenden Störungen aus.

In diesem Abschnitt werden ausschließlich die Ergebnisse der Experimente präsentiert, die Diskussion erfolgt im nächsten Kapitel.

4.2.1 Defokussierung per Kollimator mit äquidistanter Schrittweite

Der Versuchsablauf ist im Folgenden beschrieben (vgl. Abbildung 39):

Zu Beginn jeder Versuchsschleife wird eine Defokussierung um einen Betrag x mm am Kollimator eingestellt (Abbildung 39 b). Der von dieser Defokussierung hervorgerufene Pixelshift wird vom *ARMES* detektiert und mit Hilfe der in Versuch 4.1.5ff ermittelten Ausgleichsgeraden in die nötige Strecke umgerechnet, die das *ARMES* fahren muss, um wieder fokussiert zu sein. An dieser Stelle wird erneut per Kreuzkorrelation der Pixelshift gemessen und daraus die verbleibende Defokussierung berechnet.

Im nächsten Schritt beginnt dieser Regelkreis von vorne: *ARMES* fährt an die Nullposition zurück, der Kollimator wird wiederum um den Betrag x mm verstellt (sodass die Gesamtdefokussierung nun $2 \cdot x$ mm beträgt) und die Detektion beginnt erneut (Abbildung 39 c). In den Versuchen von Kapitel 4.2.1 wird immer um 4 mm defokussiert. Insgesamt wird mit dem Kollimator eine Gesamtstrecke von ± 48 mm vor und hinter dem Nullpunkt eingestellt, sodass an insgesamt 25 Positionen gemessen wird.

Pro Position wurden dabei 3 Messungen durchgeführt, d. h. es wird 3 Mal von der Nullposition aus der Pixelshift bestimmt, daraus die zu refokussierende Strecke errechnet, um diese refokussiert und schließlich erneut der Pixelshift bestimmt, um die verbleibende Defokussierung zu errechnen. (Aufgrund der knappen Laborzeit war es leider nicht möglich, im Sinne einer genaueren Statistik, eine größere Anzahl von De- und Refokussierungsschleifen zu fahren.) Pro Position und Schleife werden – wie bei den vorherigen Versuchen – jeweils 10 Bildpaare aufgenommen und kreuzkorreliert, sodass insgesamt pro Position 30 Werte zur Bildung von Mittelwert und Standardabweichung zur Verfügung stehen.

In Kapitel *Ausgleichsgeradebestimmung* wird festgestellt, dass die Zunahme des Pixelshifts nicht über die gesamte defokussierte Strecke linear ist, sondern die Steigung an einem bestimmten Punkt abnimmt, sodass der Kurvenverlauf besser über zwei Geradenanstiege approximiert werden kann. Demzufolge wird für die Über- und Unterfokussierung (vgl. Abbildung 40) die jeweils passende Gerade gewählt, um eine optimale Refokussierung zu gewährleisten. Die Darstellung dessen erfolgt der besseren Übersicht halber in zwei getrennten Diagramme.

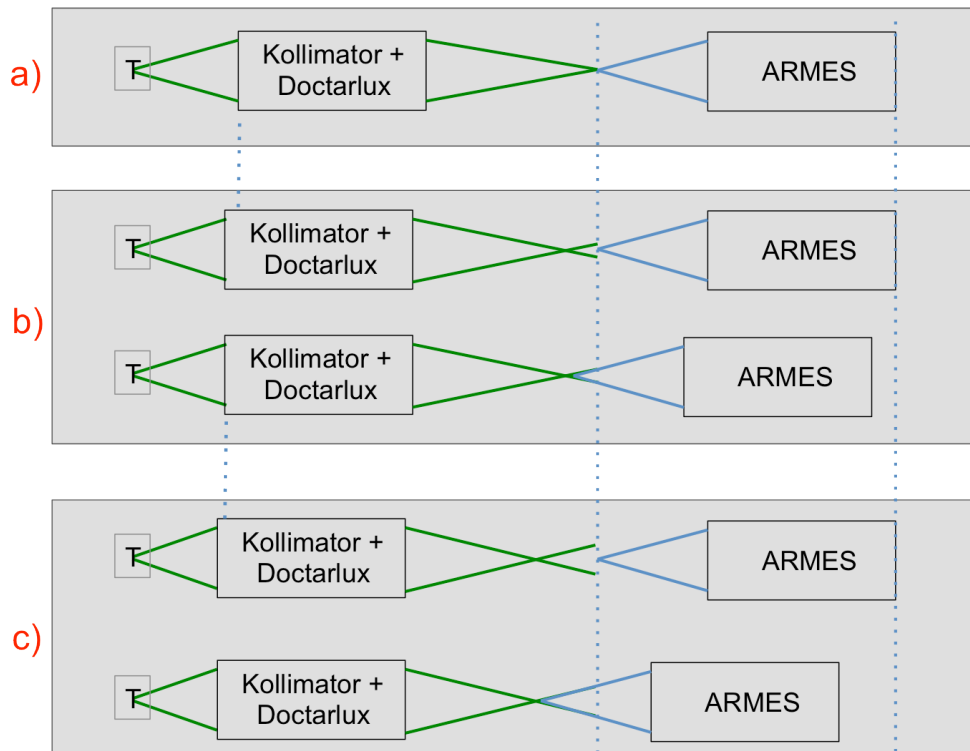


Abbildung 39 Schematischer Ablauf der ersten Versuchsreihe. a) Ausgangsposition, das System ist im Fokus. b) Es erfolgt eine Defokussierung per Kollimator um einen bestimmten Betrag, diese wird von der Ausgangsposition vom ARMES detektiert und daraufhin refokussiert. c) Nachdem das ARMES in die Ausgangsposition zurückgekehrt ist, wiederholt sich der Ablauf [b].

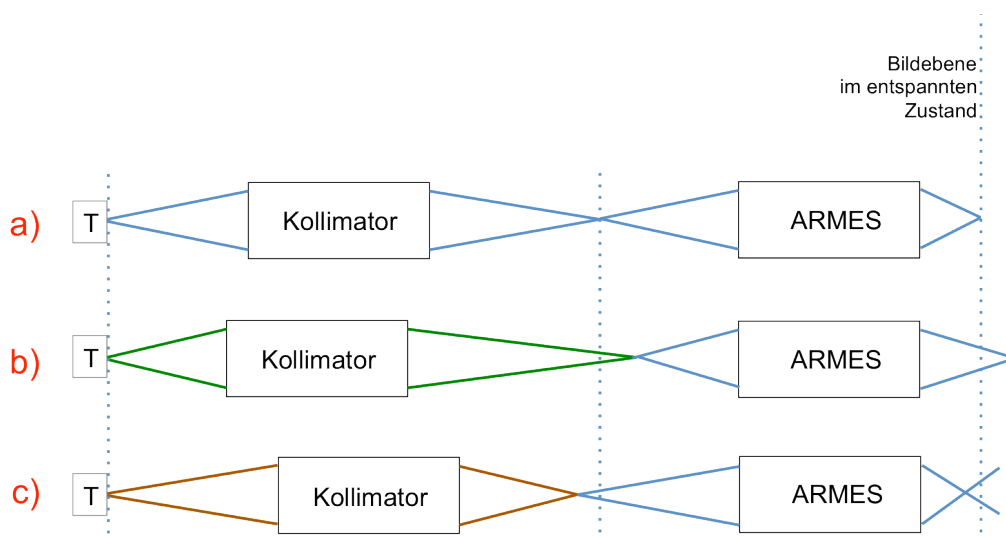


Abbildung 40 Begriffsdefinition: a) normal fokussiert, b) unterfokussiert, c) überfokussiert.

4.2.1.1 De- und Refokussierung mit Siemensstern

Die zwei folgenden Diagramme zeigen die Mittelwerte sowie deren Standardabweichungen, für den in äquidistanten Abständen, schrittweise defokussierten Siemensstern.

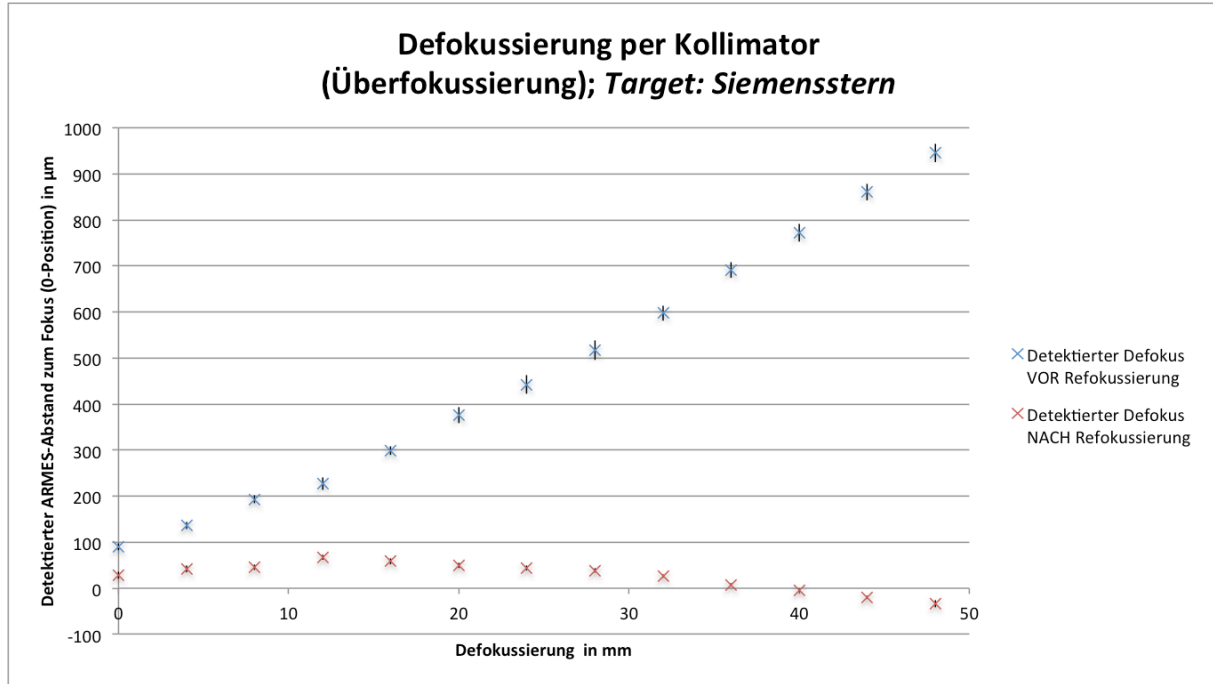


Abbildung 41| Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in *positive* Richtung auf der optischen Achse.

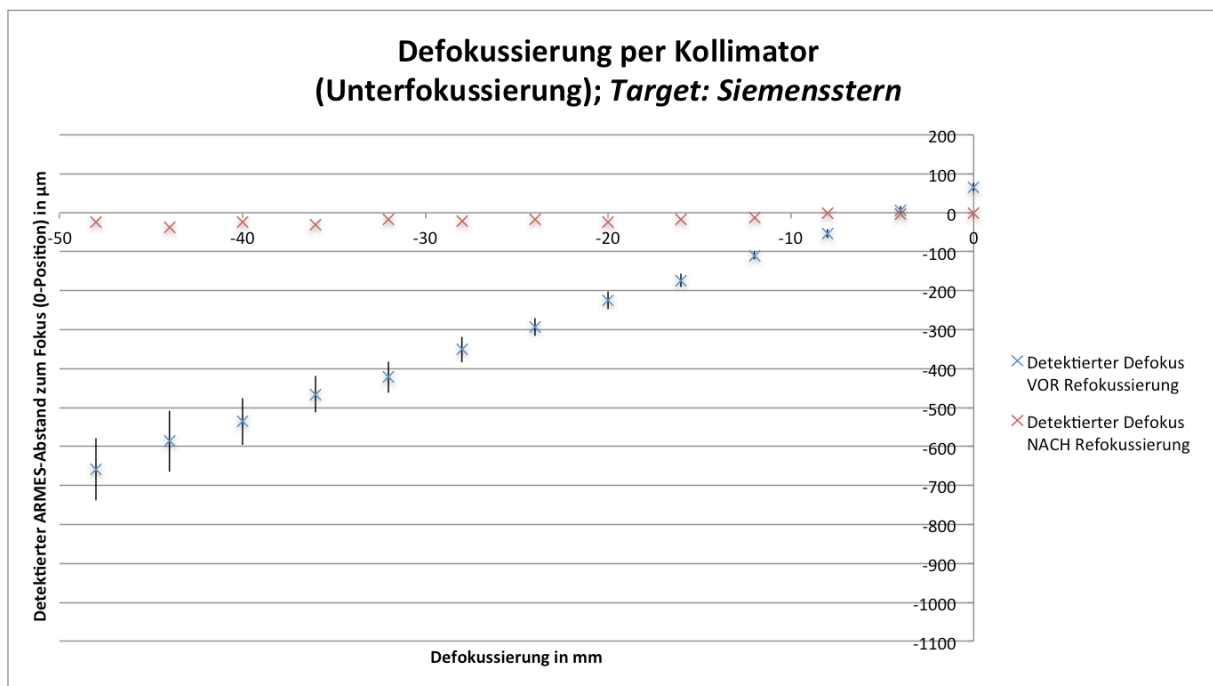


Abbildung 42| Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in *negative* Richtung auf der optischen Achse.

4.2.1.2 De- und Refokussierung mit Dia

Die zwei folgenden Diagramme zeigen die Mittelwerte sowie deren Standardabweichungen für das in äquidistanten Abständen, schrittweise defokussierte Dia.

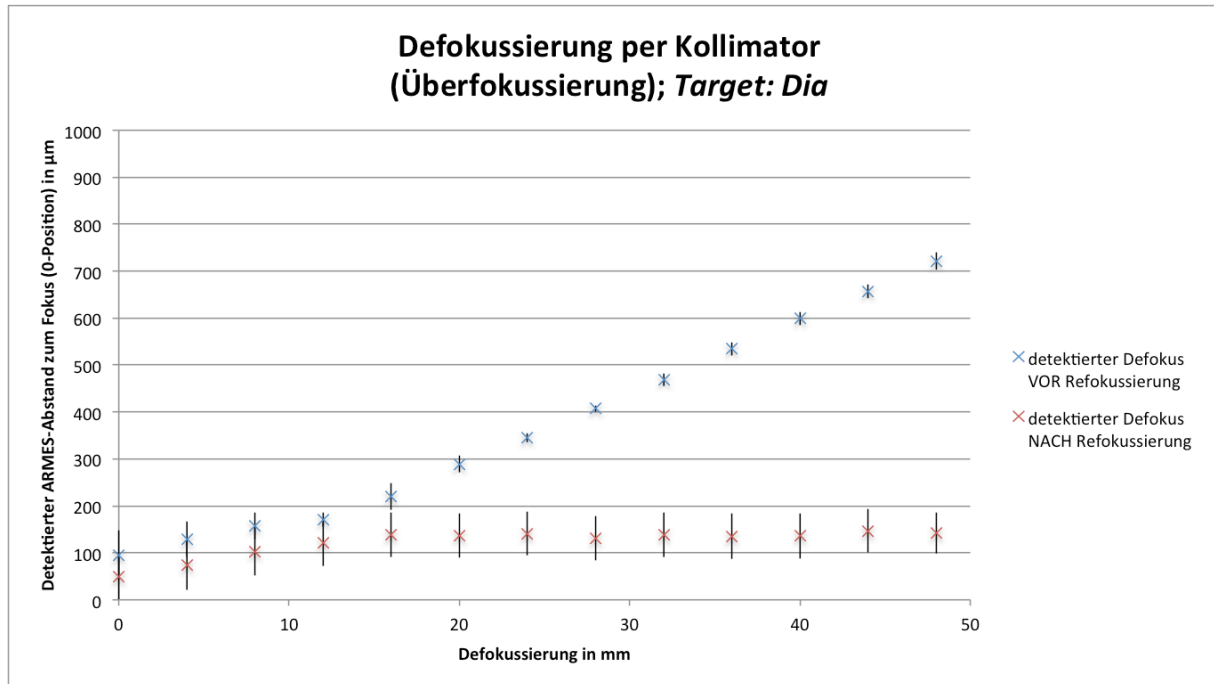


Abbildung 43| Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in *positive* Richtung auf der optischen Achse.

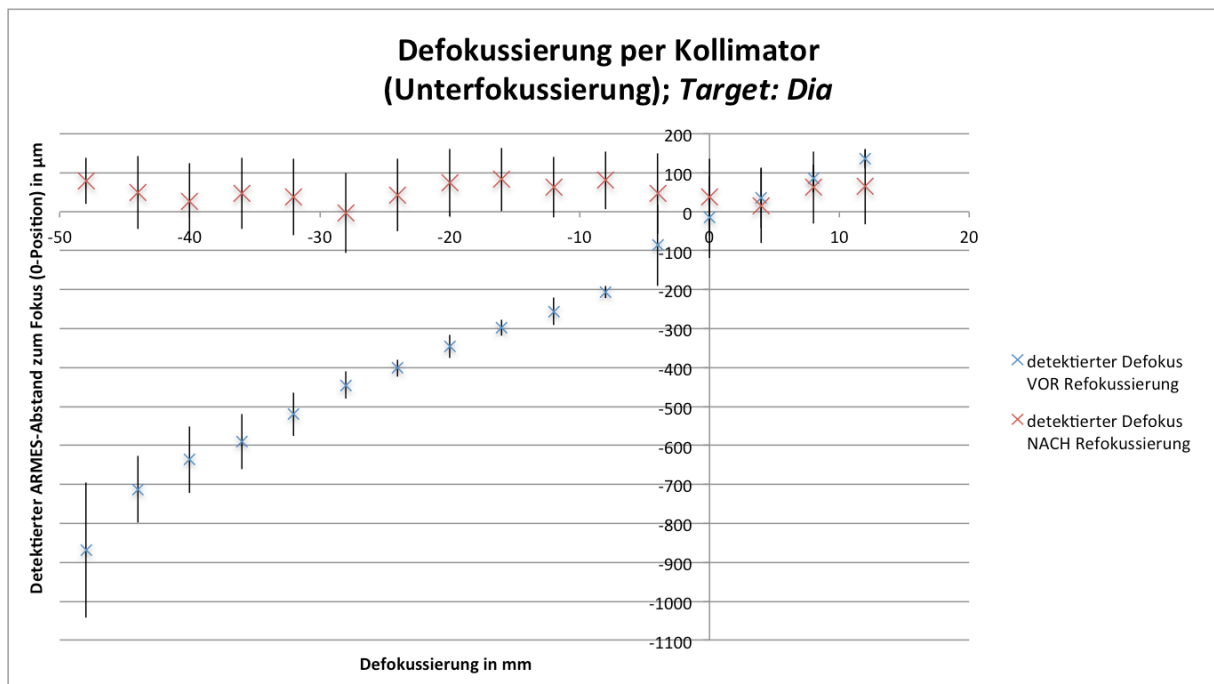


Abbildung 44| Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in *negative* Richtung auf der optischen Achse. Weil sich in den Versuchen *Ausgleichsgerade* (Kapitel 4.1.5ff) herausstellte, dass sich die ersten Positionen der Überfokussierung besser mit der Geraden für die Unterfokussierung approximieren lassen, sind für diese Werte auch die Defokuspositionen angegeben.

Sowohl beim Siemensstern, als auch beim Dia ist der unterschiedliche Abstand zur In-Fokus-Position zu erkennen, je nachdem, ob über- oder unterfokussiert wurde. Darauf wird in der Auswertung näher eingegangen.

4.2.1.3 Vergleich der Standardabweichungen

In den folgenden zwei Diagrammen werden die Standardabweichungen der bisherigen Messungen dargestellt.

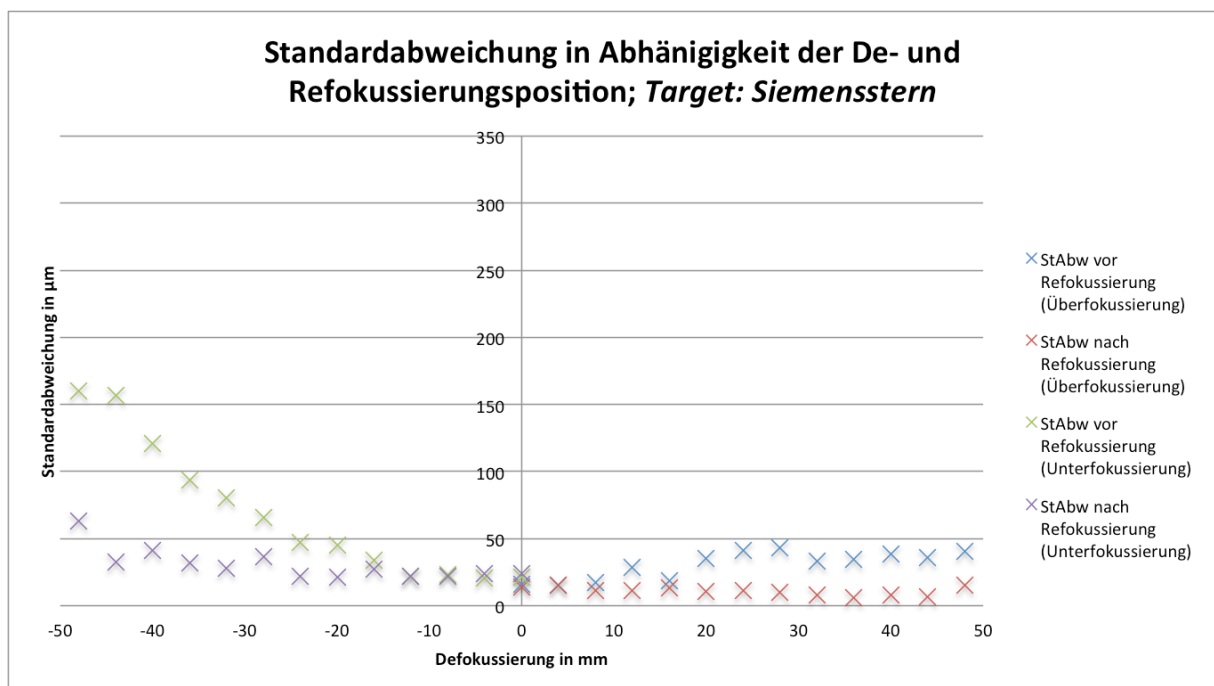


Abbildung 45| Darstellung der Standardabweichungen bei der jeweiligen Position vor und nach der jeweiligen Refokussierung für den Siemensstern.

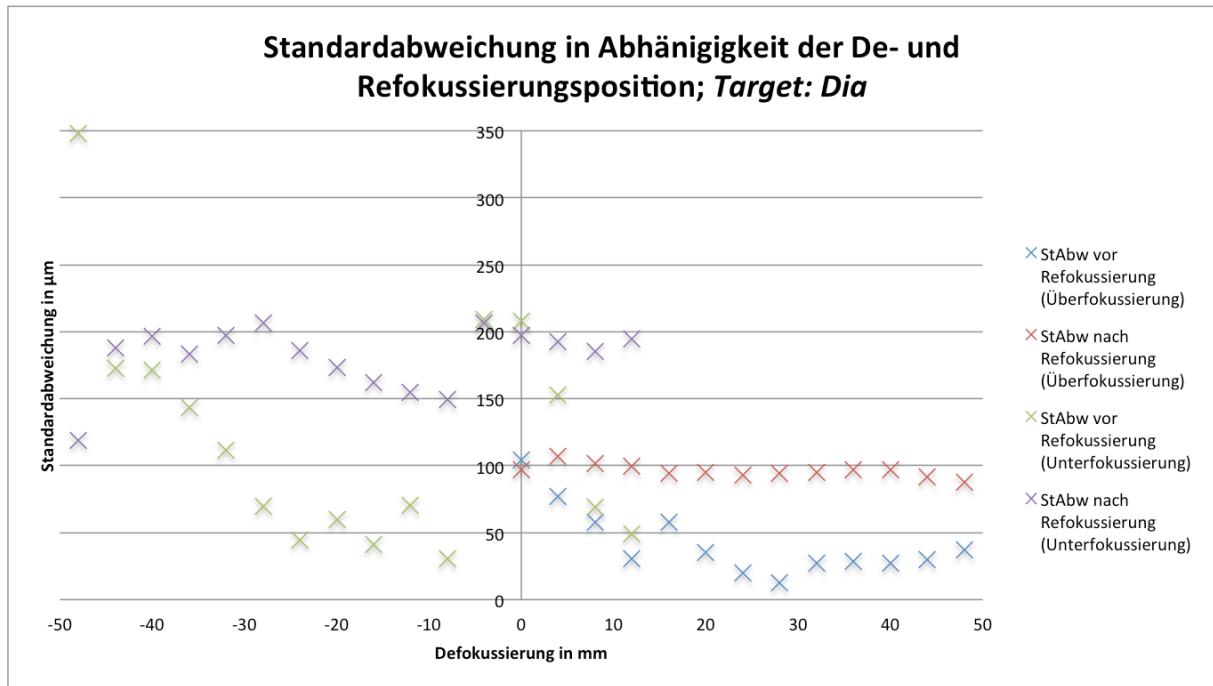


Abbildung 46| Darstellung der Standardabweichungen bei der jeweiligen Position vor und nach der entsprechenden Refokussierung für das Dia. Weil sich in den Versuchen *Ausgleichsgerade (Kapitel 4.1.5ff)* herausstellte, dass sich die ersten Positionen der Überfokussierung besser mit der Geraden für die Unterfokussierung approximieren lassen, sind für diese Werte beide Standardabweichungen angegeben.

Wie schon in den vorigen Diagrammen (Abbildung 41 bis Abbildung 44) erkennbar war, zeigt das Dia verglichen mit dem Siemensstern eine teils deutlich höhere Standardabweichung. Dieses Ergebnis wird in der Auswertung erläutert.

4.2.2 Defokussierung per Kollimator mit zufälliger Schrittweite

Der Versuchsablauf ist im Folgenden beschrieben (vgl. Abbildung 47):

Zu Beginn jeder Versuchsschleife wird eine beliebige, aber für alle vier Versuchsreihen jeweils gleiche Defokussierung am Kollimator eingestellt. Der von dieser Defokussierung hervorgerufene Pixelshift wird vom *ARMES* detektiert und mit Hilfe der in Abschnitt 4.1.5 ermittelten Ausgleichsgeraden in die nötige Strecke umgerechnet, die das *ARMES* fahren muss, um wieder fokussiert zu sein. An dieser Stelle wird erneut der Pixelshift gemessen und daraus die verbleibende Defokussierung berechnet. Im nächsten Schritt beginnt dieser Regelkreis von vorn. Im Gegensatz zu den Versuchen aus den Abschnitten 4.1.1 ... 4.1.3 wird das *ARMES* also nicht an die Nullposition zurückgefahren, sondern bleibt an der durch Refokussierung erreichten Position, um von dort die jeweils erneute Defokussierung zu detektieren. Die Defokussierung erfolgt hierbei nach keinem regelmäßigen Muster, sondern soll verschiedene, realitätsnahe Zustände simulieren, wenn sich z. B. ein Satellit nacheinander um verschiedene

Winkel neigt, bzw. sich bei einer abstandsmessenden Einheit unterschiedliche Gegenstandsweiten ergeben. Hierfür werden sowohl große als auch verschieden nahe Defokussierungen in unterschiedlichen Richtungen eingestellt. Da jedoch mit einer zweigeteilten Ausgleichsgerade gearbeitet wird, finden die De- und Refokussierungen immer getrennt für Über- und Unterfokussierung statt.

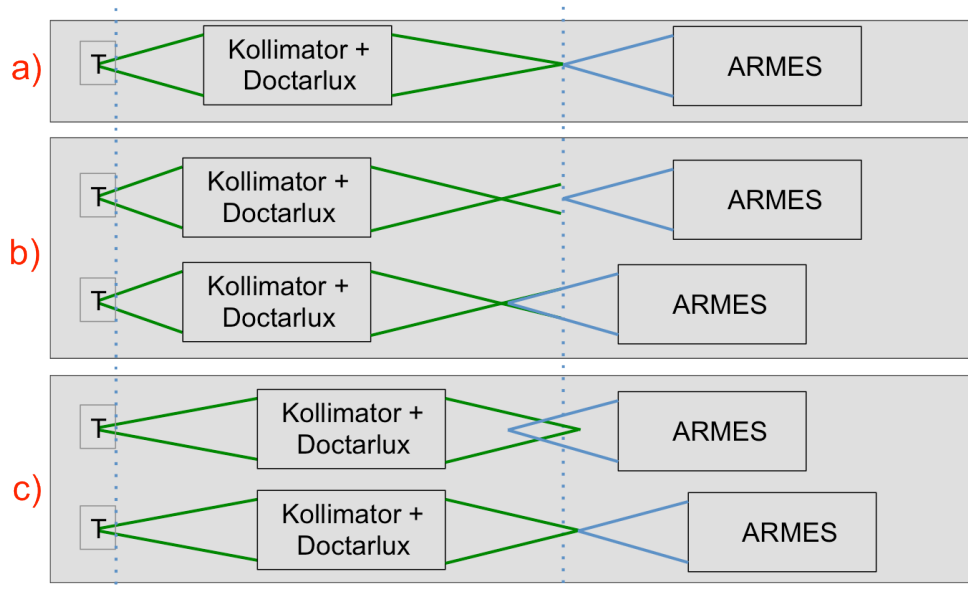


Abbildung 47 | Schematisch Darstellung der zweiten Versuchsreihe. Von der Ausgangsposition a) wird per Kollimator defokussiert [b)]. Diese Defokussierung wird detektiert und das *ARMES* refokussiert entsprechend. Von dieser Position ausgehend beginnt der Regelkreis aus De- und Refokussierung erneut [c)].

Neben den gemessenen Mittelwerten mit Standardabweichung in Abbildung 48 bis Abbildung 51 (grüne und violette Balken), werden in den folgenden Diagrammen auch theoretisch berechnete Werte (rote Balken) dargestellt. Hierfür wurden die relativen Defokussierungen – welche in den Diagrammen als erster Wert unter den Abszissen aufgeführt sind – mit den in Kap. 4.1.5. ff. ermittelten Funktionen für die Ausgleichsgeraden verrechnet.

4.2.2.1 De- und Refokussierung mit Siemensstern

Die zwei folgenden Diagramme zeigen den theoretisch berechneten Defokus sowie Mittelwerte und Standardabweichungen des detektierten Defokus vor und nach der Refokussierung des Siemenssterns.

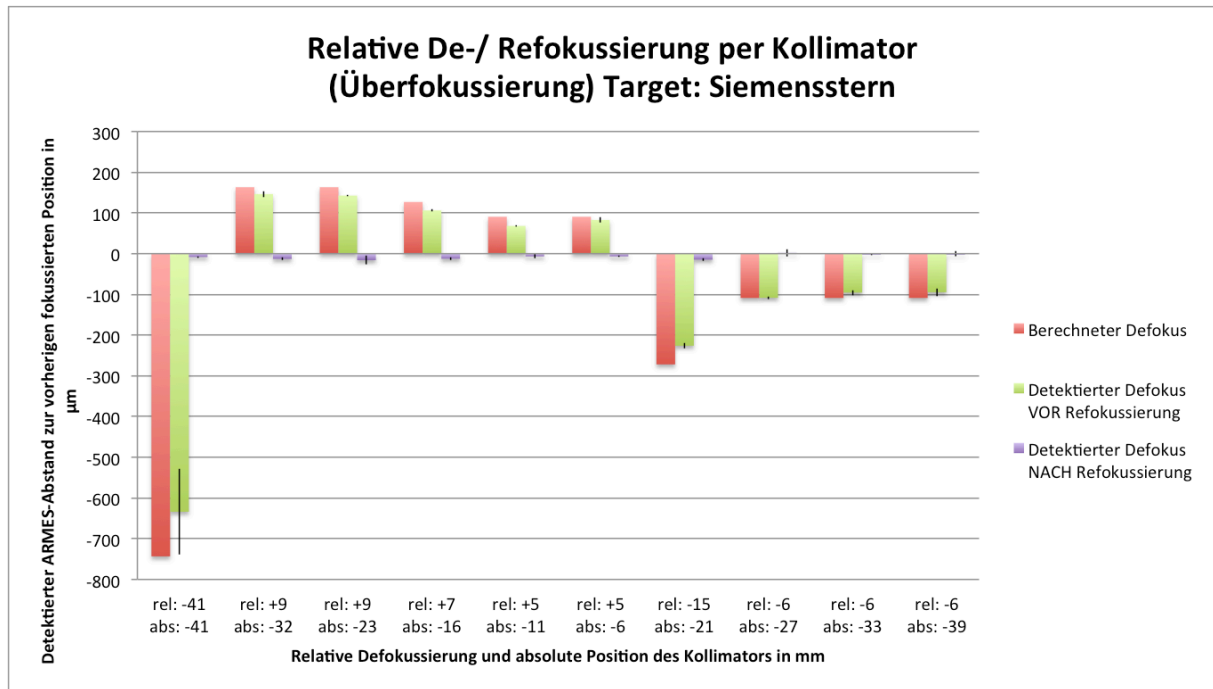


Abbildung 48 | De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.

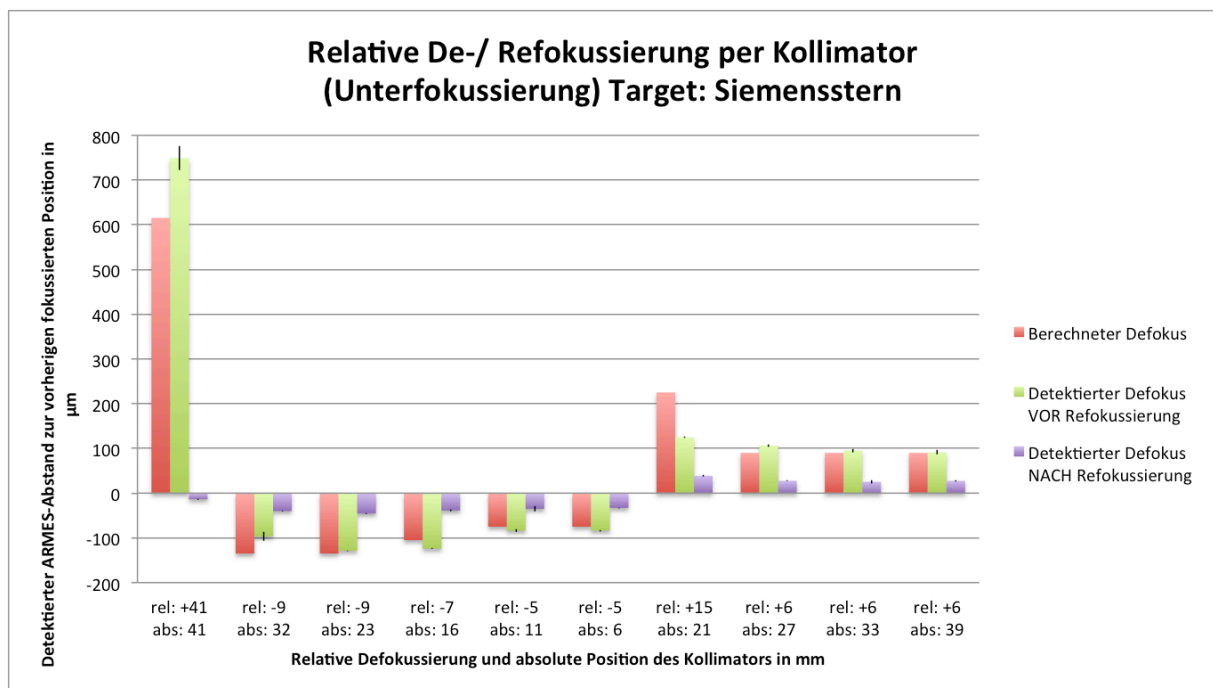


Abbildung 49 | De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.

Generell ist zu erkennen, dass die per Phasendetektion ermittelten Werte näherungsweise mit den berechneten übereinstimmen. Der detektierte Defokus nach der Refokussierung ist relativ gering, bei der Unterfokussierung jedoch größer als bei der Überfokussierung.

4.2.2.2 De- und Refokussierung mit *Target Dia*

Die zwei folgenden Diagramme zeigen den theoretisch berechneten Defokus, sowie Mittelwerte und Standardabweichungen des detektierten Defokus vor und nach der Refokussierung des Dias.

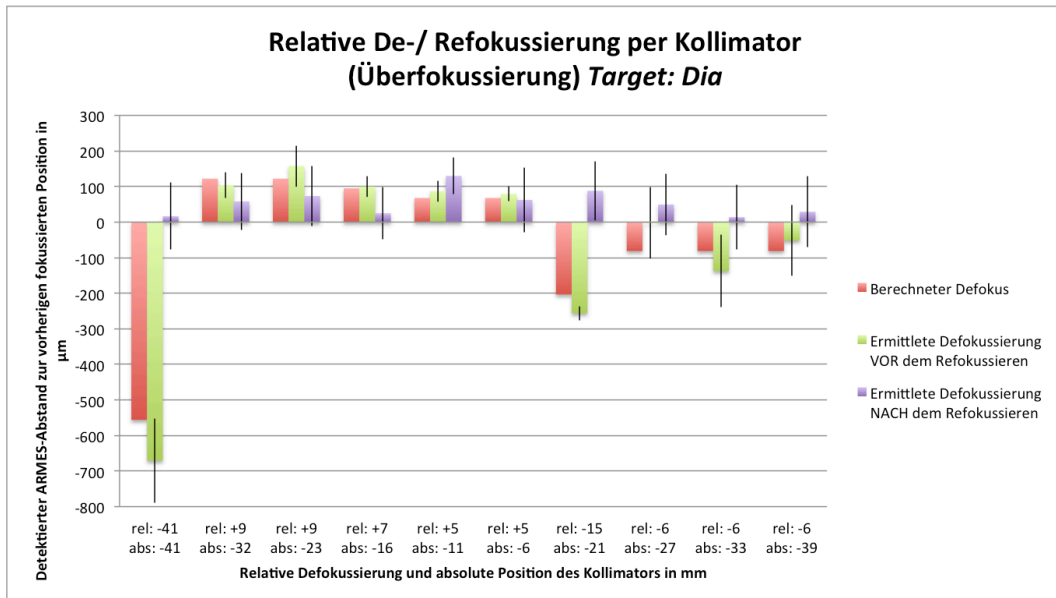


Abbildung 50 De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.

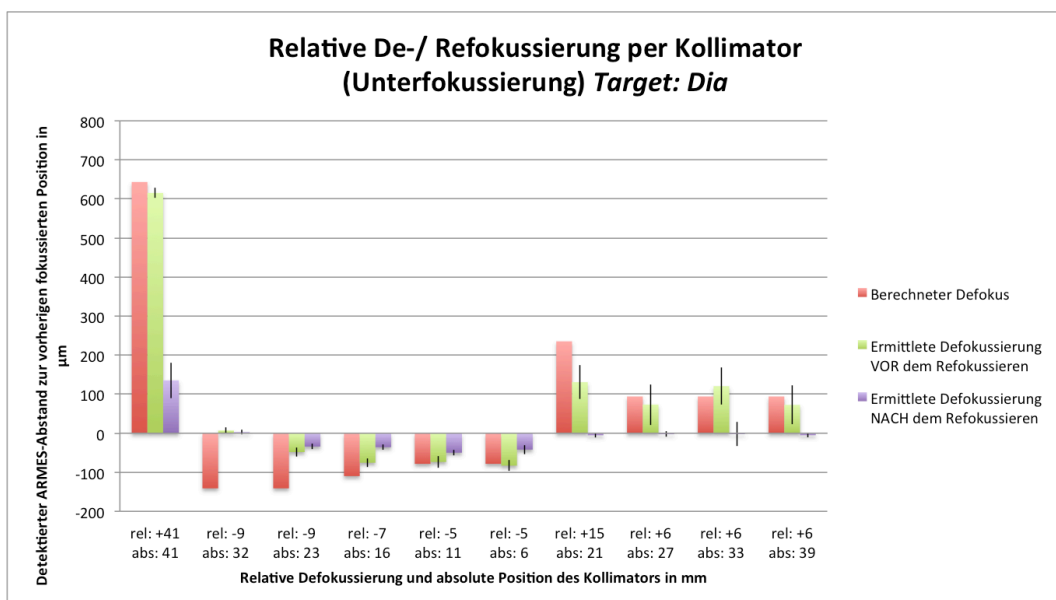


Abbildung 51 De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.

Die berechneten und detektierten Defokussierungen vor der Refokussierung zeigen beim Dia weitaus größere Abweichungen als beim Siemensstern. Auch die gemessene Defokussierung nach dem Refokussieren ist starken Schwankungen unterworfen.

4.2.2.3 Vergleich der Standardabweichungen

Zur besseren Vergleichbarkeit beider *Targets*, werden im Gegensatz zur bisherigen Darstellungsweise im Folgenden nicht die über- und unterfokussierten Wertepaare für ein *Target* zusammen nacheinander dargestellt, sondern jeweils die Über-, respektive Unterfokussierung für die beiden unterschiedlichen *Targets*.

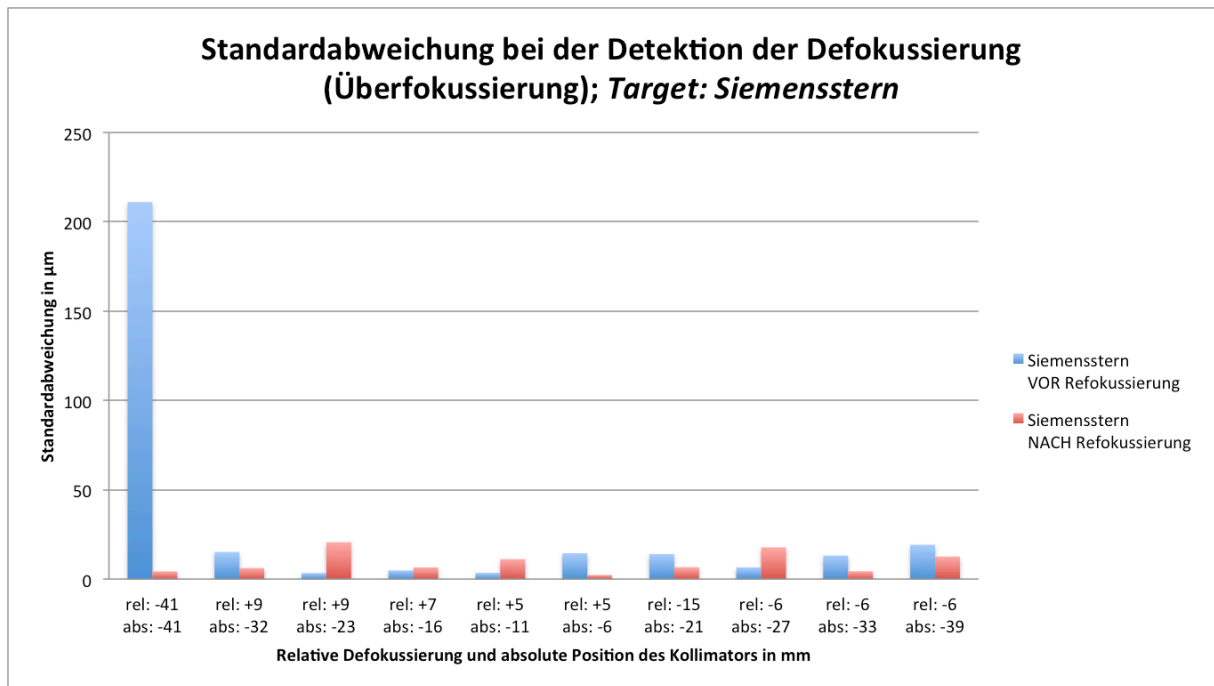


Abbildung 52| Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.

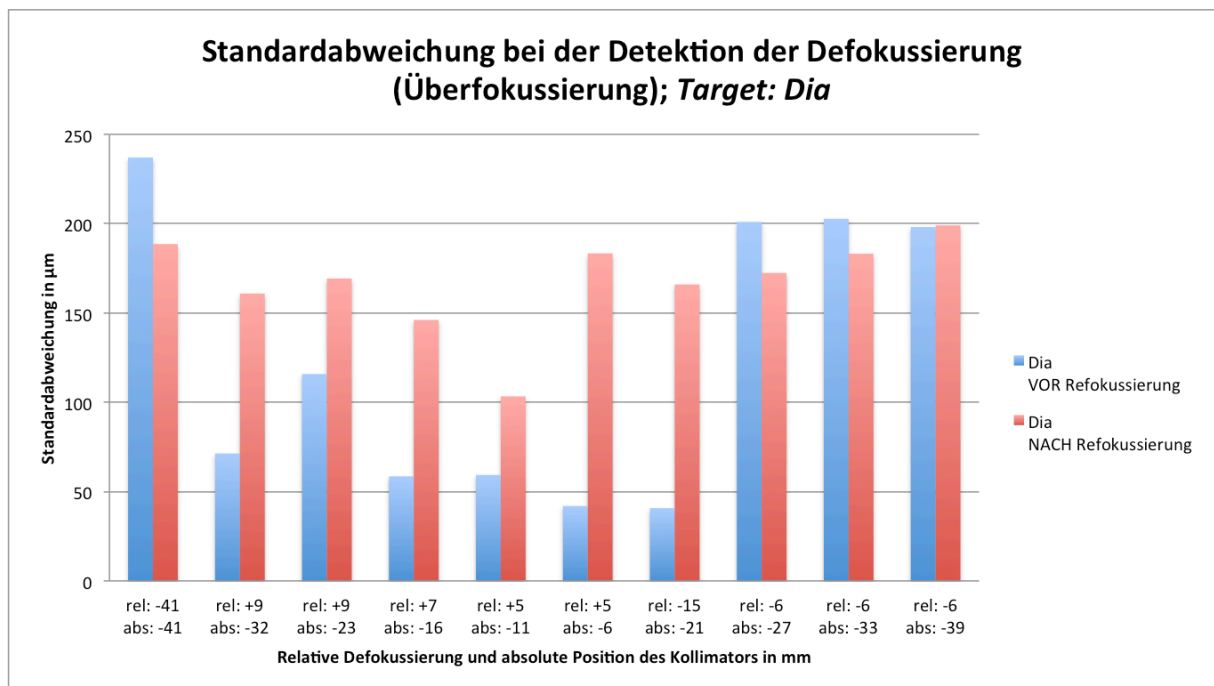


Abbildung 53| Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.

Wie schon bei den Versuchen bei denen kontinuierlich schrittweise defokussiert wurde, ist eine deutlich höhere Standardabweichung beim Dia zu verzeichnen.

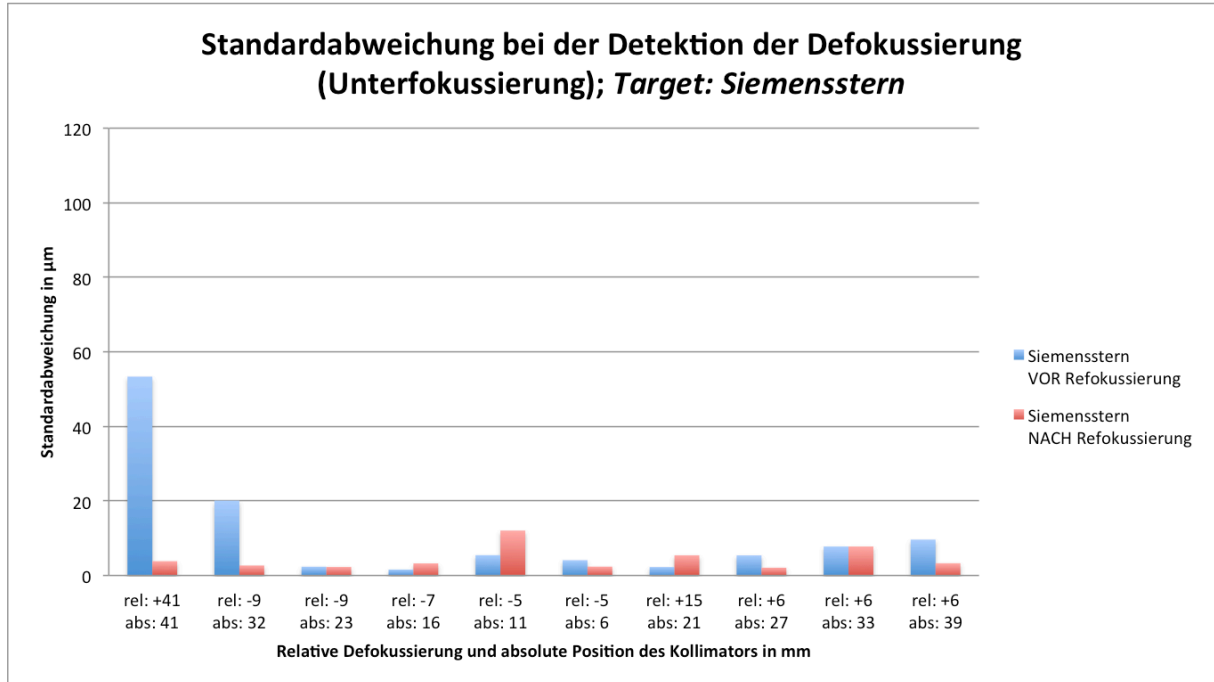


Abbildung 54| Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.

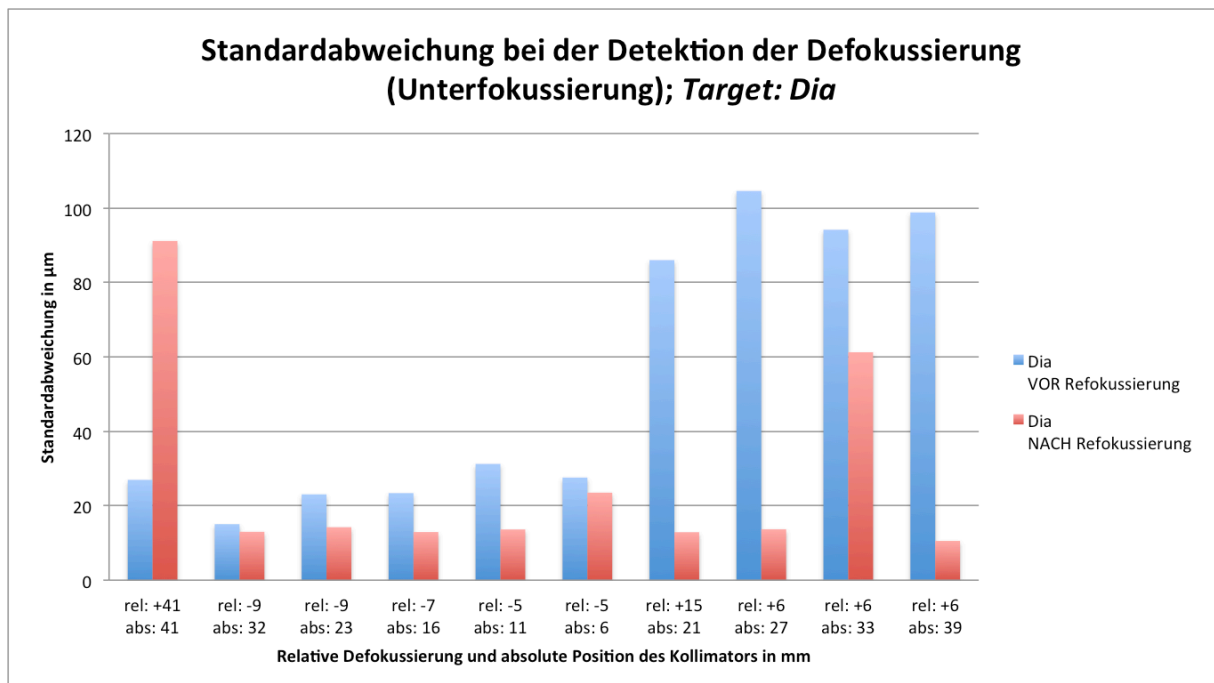


Abbildung 55| Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.

Auch hier weist das Dia eine höhere Standardabweichung auf. Im Falle beider *Targets* ist sie jedoch nur etwa halb so stark, wie bei den vorherigen Versuchen der Überfokussierung.

4.3 Zusammenfassung

In Abschnitt 4.1 konnte gezeigt werden, dass das Prinzip der Detektion der Defokussierung nach dem Phasendetektionsverfahren funktioniert. Weiterhin wurde in Abschnitt 4.2 nachgewiesen, dass mittels dieses Verfahrens auch eine Refokussierung, sowohl von der In-Fokus-Position des Systems, als auch von einer willkürlich gewählten Position aus möglich ist.

Da es sich hier um einen experimentellen Aufbau mit Standardteilen und nicht idealer Justierung handelt, weist er allerdings noch Ungenauigkeiten auf. Diese wirken sich besonders auf die Genauigkeit der Refokussierung aus. So kann bei keinem der gemachten Versuche eine Refokussierung erreicht werden, die sich im Bereich der Schärfentiefe des Systems befindet. Der Bereich der einfachen Schärfentiefe ist laut Formel 3 bei diesem System $= 17,6 \mu\text{m}$ ($f\# = 4$). Die für professionelle Anwendungen geforderte Genauigkeit liegt noch um den Faktor 1/14 darüber. Diese Genauigkeiten können nur mit Systemen erreicht werden, dessen Optikdesign darauf optimiert wird und dessen Komponenten entsprechend präzise gefertigt werden.

5 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse diskutiert. Zuerst wird auf die Experimente zur Ermittlung der Ausgleichsgeraden in Kapitel 4.1 eingegangen. Im Anschluss werden die De- und Refokusexperimente in Kapitel 4.2 erläutert.

5.1 Problematik stochastisch verteilter Motivmuster

Bei der Betrachtung der Standardabweichungen der drei *Targets* (Abbildung 27 und 29) sind drei Merkmale besonders aufgefallen (s. Kapitel 4.1.5.1):

- 1) Siemensstern und *Slanted Edge* zeigen verstärkte Abweichung im rechten Diagrammarm.
- 2) Das Dia zeigt um den Fokuspunkt herum eine größere Standardabweichung als die anderen *Targets*.
- 3) Je weiter defokussiert wird, desto größer wird die Standardabweichung generell.

Zu 1) Die *Slanted Edge* besteht aus einer vollständig maskierten (schwarzen) und einer transparenten Hälfte. Im Kollimator befindet sich zwischen Lichtquelle und *Target* eine strukturierte Milchglasscheibe, die der Homogenisierung des Lichtes dient. Wenn das ARMES in diese Richtung bewegt wird (vgl. Abbildung 56), wird von den Kameras das Bild dieser Streuscheibe registriert, welche eine Struktur ähnlich einem *Speckle*-Muster besitzt (vgl. Abbildung 57).

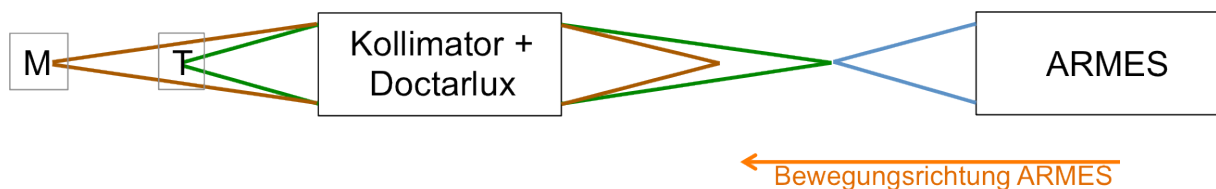


Abbildung 56 | Schematische Darstellung der Problematik die zur erhöhten Standardabweichung bei der *Slanted Edge* führt. M = Milchglasscheibe, T = *Target*.

Die Kreuzkorrelation scheint durch das zufällig verteilte, feine Muster der Streuscheibe gestört zu werden. In der Zufälligkeit der Muster wird bei gleicher Defokusposition anscheinend immer wieder an anderer Stelle eine scheinbare Korrelationen erkannt, was im Endeffekt zu der starken Standardabweichung führt.

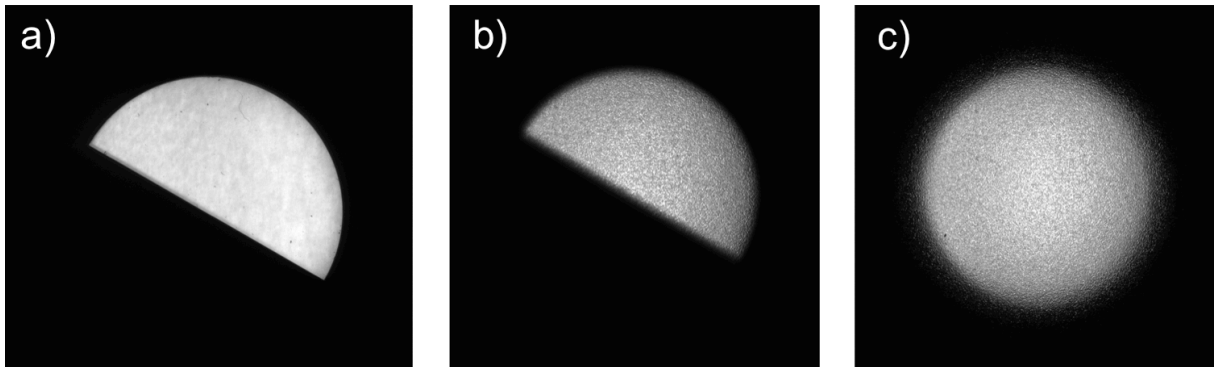


Abbildung 57 a) *Slanted Edge* nahe des Fokuspunktes des Kollimator-Doctarlux-Systems. Das *Target* ist nahezu homogen ausgeleuchtet. b) Bei ausreichend starker Defokussierung wird die streuende Milchglasscheibe durch das *Slanted Edge Target* sichtbar. c) Abbildung der Streuglasscheibe ohne *Target* davor. Deutlich ist die Strukturierung erkennbar. (Der Kontrast dieser Aufnahmen wurden der besseren Erkennbarkeit wegen optimiert.)

Zu 2) Die Abweichungen um den Nullpunkt (= Fokus) herum beim Dia können verschiedene Gründe haben.

Einerseits kann es selbst schon mit einer Unschärfe belegt sein, da die Aufnahme selbst nur eine gewisse limitierte Schärfentiefe hat. Dies hätte allerdings eine über den ganzen Bereich erhöhte Standardabweichung zur Folge. Da dies aber nicht der Fall ist, wird es für unwahrscheinlich gehalten, dass die intrinsische Unschärfe negative Auswirkungen auf den Auswertalgorithmus hat.

Eine andere Möglichkeit den Anstieg um den Fokus herum zu erklären ist die Körnung des Dias. Diese ist, wie die Struktur der Milchglasscheibe, zufällig verteilt. Analog zu den Problemen mit der *Slanted Edge* könnte die Körnung des Dias für die erhöhte Standardabweichung verantwortlich sein. Dafür spricht die Tatsache, dass bei einer Bewegung des *ARMES* vom Fokuspunkt weg, die Standardabweichung erst abfällt, bevor sie, wie bei den anderen *Targets*, bei größerer Entfernung wieder zunimmt. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Kameras und Linsen des *ARMES* eine begrenzte Schärfentiefe haben. Wenn dieser verlassen ist, wird das Korn nicht mehr als Struktur abgebildet und hat somit keinen störenden Einfluss auf die Kreuzkorrelation mehr.

Allerdings zeigt das Dia noch an den weit entfernten Randbereichen nur eine moderate Abweichung, auch im Vergleich mit dem Siemensstern. Dies hat zwei Gründe: Der Siemensstern besteht, wie die *Slanted Edge*, aus gänzlich abgeschatteten und transparenten Feldern. Im Gegensatz zur *Slanted Edge* weist er allerdings weit mehr Frequenzen auf, die durch ihren abgebildeten hohen Kontrast leichter von dem Kreuzkorrelationsalgorithmus erkannt werden als die hohen Frequenzen der Streuscheibe die aber einen niedrigeren Kontrast haben.

Zusätzlich ist das Dia an kaum einer Stelle so transparent wie die anderen *Targets*. Dadurch wird die Struktur der Streuscheibe stets gedämpft wodurch größtenteils die Abbildung des Dias für die Kreuzkorrelation verwendet werden.

Zu 3) Durch die zunehmende Unschärfe nimmt der Kontrast auf dem Sensor ab, wodurch sich der Signal-Rausch-Abstand vermindert. Durch das verstärkte Rauschen treten einzelne Pixel stärker hervor, die der Kreuzkorrelationsalgorithmus wieder als zufällige Muster interpretiert. Dies ist analog dem Effekt der Streuscheibe, der unter 1) und 2) beschrieben ist.

5.1.1 Schwierigkeiten bei realen Szenen

Dies alles führt zu dem Schluss, dass die Kreuzkorrelation anfällig für reproduzierbare und stochastisch verteilte Muster ist. In einer realen Anwendung auf einem Satelliten kann es hierbei zu Problemen über Gebieten kommen, die eine zufällig verteilte Oberflächenstruktur aufweisen. Dies können zum Beispiel Dschungel, Wüsten, Gewässer und andere ähnliche Motive sein. Eine Möglichkeit, die das Fokussieren bei solchen Szenen dennoch erlaubt, ist gegeben, indem auf die Methode des Phasenvergleichs verzichtet und auf Kontrastdetektion zurückgegriffen wird. Diese ist zwar langsamer, aber nicht anfällig für diese Art der Fehler.

5.2 Auswertung der Experimente zur Bestimmung der Ausgleichsgeraden

In diesem Kapitel wird auf verschiedene Weise versucht, den Verlauf der Ausgleichsgeraden aus Kapitel 4.1 nachzuvollziehen. Dafür werden eine Simulation mit *Zemax* und verschiedene theoretische Berechnungen durchgeführt.

5.2.1 Simulation der Ausgleichsgeraden mit *Zemax*

Wie schon an voriger Stelle erwähnt, besteht das *Zemax*-Modell aus Paraxiallinsen, da bis auf die jeweiligen Brennweiten und Öffnungsdurchmesser, bzw. Blendenzahlen von keiner der relevanten Einzelkomponenten genauere Information vorliegen. Zur Simulation werden folgende Parameter verwendet:

- Einzellinse: Brennweite: 80 mm, A: 20 mm
- *Fujinon*-Objektive: Brennweite: 50 m, f# 4
- Detektor: Pixelgröße: 2,2 μm x 2,2 μm , Pixelanzahl: 2592 x 1944
- Anzahl Strahlen in Zemax: 4 Mrd. (entspricht maximaler Anzahl)
- Schrittweite: 100 μm pro Defokussierungsschritt

- Simuliertes *Target*: Siemensstern

In der Abbildung 58 sind die simulierten zusammen mit den experimentell ermittelten Mittelwerten aufgetragen. Die simulierten Bilder wurden mit demselben Algorithmus ausgewertet wie die realen.

Es ist zu erkennen, dass die mit *Zemax* erhaltenen Werte grundsätzlich mit den real gewonnenen vergleichbar sind. Sie befinden sich in der selben Größenordnung, zeigen jedoch einen flacheren Kurvenverlauf als die real ermittelten. Aufgrund der langen Dauer der *Zemax*-Simulation (Rechner mit 12 *Intel® Xeon® X5690* Prozessoren [3,46 GHz] braucht 24 h pro Durchlauf) und der begrenzten Kapazitäten war es nicht möglich, mehrere Durchläufe durchzuführen, um einen Mittelwert der *Zemax*-Daten zu erhalten. Es ist davon auszugehen, dass der Verlauf größeren Schwankungen unterworfen ist, da schon die Auswertung in Abschnitt 5.1 zeigte, dass die Kreuzkorrelation anfällig für stochastisch verteilte Muster ist. Da die Anzahl der Strahlen in *Zemax* endlich ist, sind eindeutig Pixel in den Bildern erkennbar, sodass angenommen werden muss, dass die Kreuzkorrelation auch hierbei von den zufälligen Mustern gestört wird.

Aufgrund dieser Tatsache scheint diese Art der Simulation nicht für die Validierung von Ergebnissen geeignet zu sein.

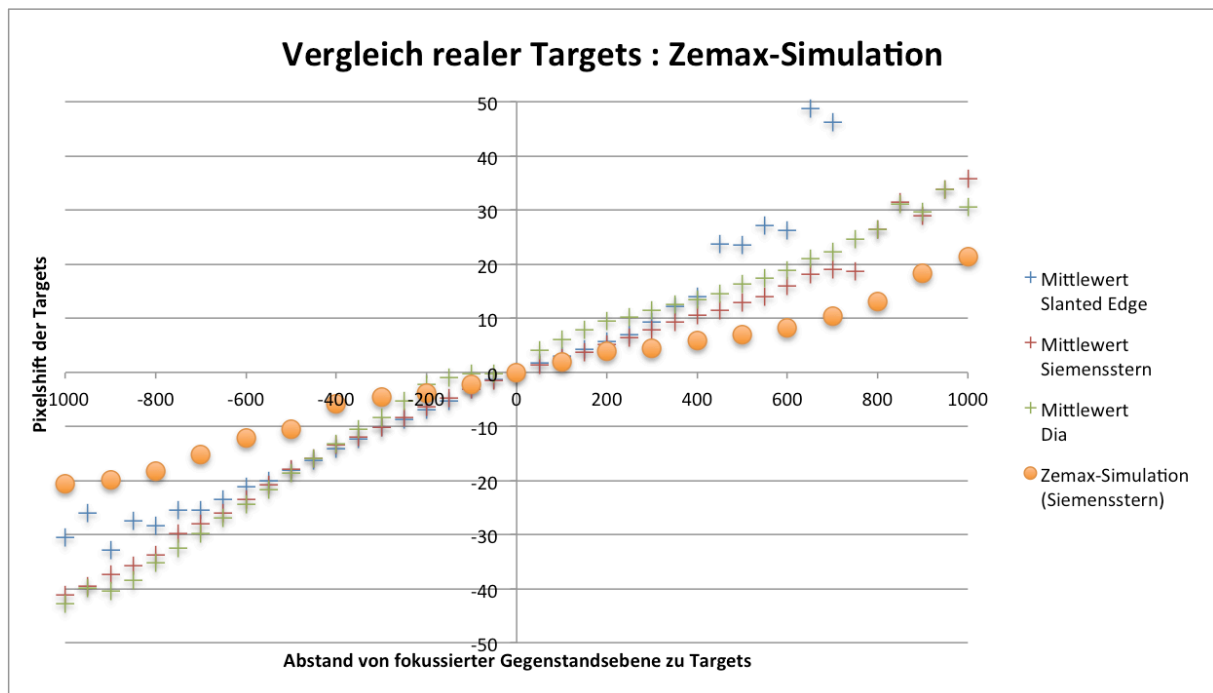


Abbildung 58| Vergleich realer *Targets* zu simuliertem Siemensstern.

5.2.2 Berechnung einer nichtlinearen Ausgleichsgerade

Bei der Ermittlung der Ausgleichsgeraden in Kapitel 4.1.5 und 4.1.5.1 ist aufgefallen, dass eine Anpassung an die gewonnen Messwerte mit nur einer Ausgleichsgeraden ungenau ist, da der Anstieg auf beiden Seiten des Nullpunktes nicht identisch ist. Da es sich um ein Unschärfeproblem handelt, findet sich ein Erklärungsansatz in der Betrachtung des Verhaltens des bildseitigen Zerstreungskreises (zk_a) bei Defokussierung. In Abbildung 59 ist schematisch dargestellt, dass bei betragsmäßig gleicher Defokussierung (Δa) der Zerstreungskreis bei Überfokussierung größer ist als bei Unterfokussierung ($zk_{a'2} > zk_{a'1}$).

Im Folgenden wird versucht, dieses Verhalten mit Hilfe zweier Verfahren, nämlich über den Abbildungsmaßstab β' und die Newton'sche Abbildungsgleichung aus dem gegenstandsseitigen Zerstreungskreis ZK_{an} zu berechnen. Für beide Ansätze muss das optische System aus Einzellinse und *Fujinon*-Objektiv bestimmt werden, wofür auf die Matrixmethode der Optik zurückgegriffen wird. Alle hierbei verwendeten Variablennamen können der Abbildung 60 entnommen werden.

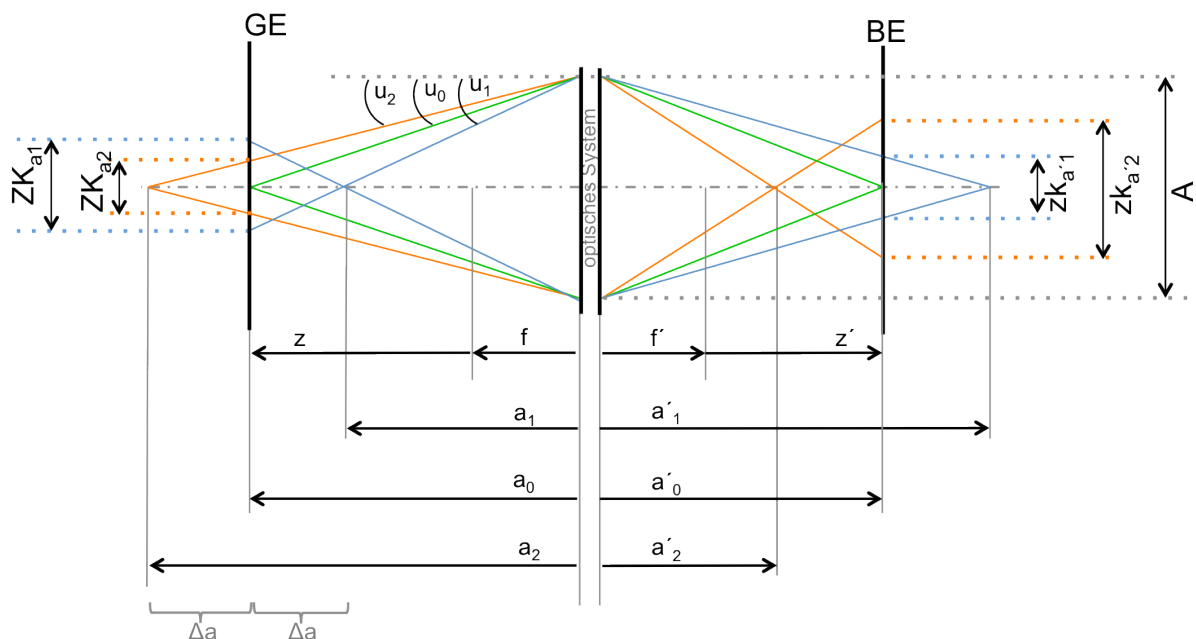


Abbildung 59 Schematische Darstellung des Strahlenganges bei Defokussierung und Bezeichnung der Teilstrecken im optischen System.

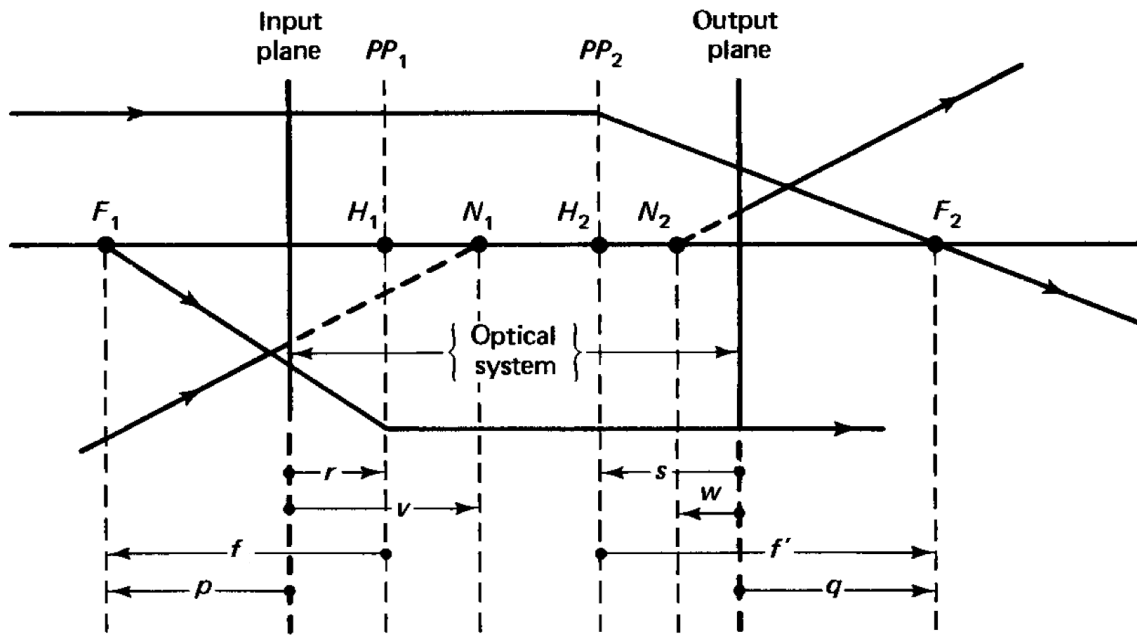


Abbildung 60 | Kardinalpunkte und nötige Streckenangaben zur Berechnung eines optischen Systems mittels der Matrixmethode. Abbildung aus Pedrotti³⁶.

5.2.2.1 Bestimmung des Gesamtsystems aus Einzellinse und Fujinon-Objektiv

Zur Bestimmung der Parameter des Gesamtsystems werden Einzellinse sowie Objektiv als dünne Linsen L_1 ($f'_1 = 80 \text{ mm}$) und L_2 ($f'_2 = 50 \text{ mm}$) mit dem Abstand $d = 91 \text{ mm}$ approximiert. Die Gesamtmatrix M ergibt sich aus der Multiplikation der Einzelmatrizen der Linsen L_1, L_2 und der Translationsmatrix T :

$$M = L_2 \cdot T \cdot L_1 = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/f'_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/f'_1 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 - d/f'_2 & -d \\ 1/f'_1 (1 - d/f'_2) + 1/f'_2 & 1 - d/f'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,82 & -91 \text{ mm} \\ 0,00975 \text{ mm}^{-1} & -0,1375 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Der Abstand zwischen *Input* und *Output Plane* in Abbildung 60 entspricht d (vgl. hierfür auch Abbildung 61). Von diesen beiden gegebenen Ebenen aus werden mithilfe der berechneten Matrixelemente in Formel 6 alle restlichen nötigen Punkte, bzw. Ebenen gewonnen. Für die Lage der Hauptebenen (engl: *principle planes, PP*) PP_1 und PP_2 werden die Strecken r und s benötigt. Nach Pedrotti³⁶ wird dafür zuerst die Gesamtbrennweite f' des Systems aus dem Matrixelement C abgeleitet:

$$f' = \frac{1}{C} \approx 103 \text{ mm}. \quad (7)$$

$$r = \frac{f'}{f'_{\text{Objektiv}}} d \approx 187 \text{ mm} \quad (8)$$

$$s = -\frac{f'}{f'_{\text{Einzellinse}}} d \approx -117 \text{ mm}. \quad (9)$$

Der Übersichtlichkeit halber sind die berechneten Strecken und die sich daraus ergebenden Ebenen in Abbildung 61 dargestellt:

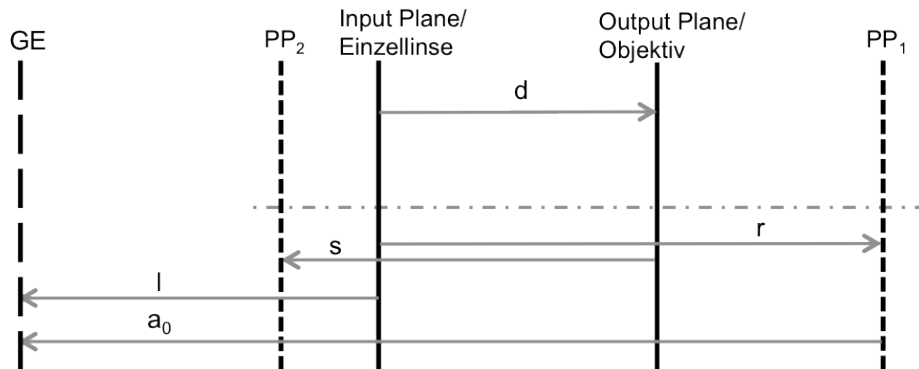


Abbildung 61 | Nicht maßstabsgetreue Darstellung zur Lage einiger Ebenen und Strecken im Gesamtsystem. Die Bezeichnungen korrespondieren mit den im Text angegebenen und den in Abbildung 59 und Abbildung 60 gezeigten. Außer: l = Abstand Linse – GE = 80 mm.

Von den Hauptebenen aus kann anschließend mit den objekt- und bildseitigen Brennweiten weitergearbeitet werden. Die objektseitige Abstand p der *Input Plane* zum Brennpunkt F_1 ergibt sich aus

$$p = -\frac{D}{C} \approx -14 \text{ mm} \quad (10)$$

woraus die objektseitige Brennweite f folgt:

$$f = p - r \approx -173 \text{ mm} \quad (11)$$

Anhand dieser Informationen kann nun der bildseitige Zerstreuungskreis $zk_{a'n}$ berechnet werden. Zunächst wird dafür der gegenstandsseitige Zerstreuungskreis ZK_{an} über Winkelfunktionen ermittelt:

$$ZK_{an} = |a_0 - a_n| \cdot \frac{A}{a_n} \quad (12)$$

mit $n=1, 2$ in Abbildung 59.

5.2.2.2 Ermittlung des bildseitigen Zerstreuungskreises über den Abbildungsmaßstab β'

Der Abbildungsmaßstab β' des Systems ist

$$\beta' = -\frac{a'_n}{a_n} = 1 - \frac{a'_n}{f'} \quad \text{mit} \quad a'_n = -\frac{f' \cdot a_n}{f' - a_n}. \quad (13)$$

Über diesen lässt sich der bildseitige Zerstreuungskreis berechnen:

$$zk_{a'n} = ZK_{an} \cdot \beta' = A \cdot \frac{|a_0 - a_n|}{a_n} \cdot \left(1 - \frac{a'_n}{f'}\right). \quad (14)$$

Daraus ergibt sich der in Abbildung 62 gezeigte prinzipielle Funktionsverlauf, der erkennbar nicht linear verläuft:

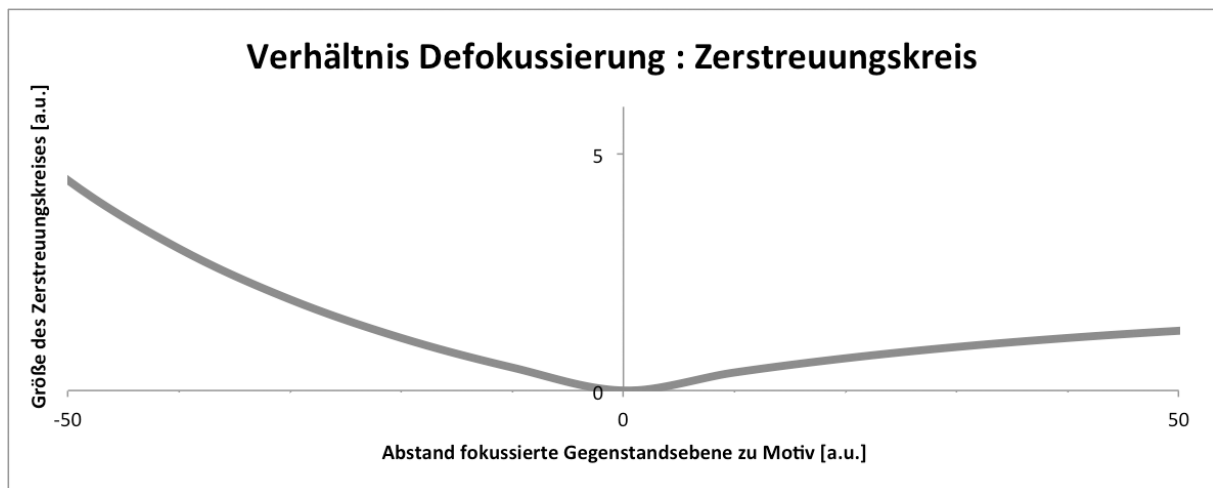


Abbildung 62| Prinzipieller Verlauf der Größenänderung des Zerstreuungskreises bei Defokussierung.

Je weiter überfokussiert wird (Abbildung 59, a_2), desto stärker wird der Anstieg, wohingegen bei Unterfokussierung (Abbildung 59, a_1) der Kurvenverlauf immer flacher wird, da sich der zugehörige bildseitige Zerstreuungskreis $zk_{a'1}$ nicht so rasch vergrößert wie $zk_{a'2}$. Dies ist damit zu begründen, dass die Zunahme des Durchmessers des gegenstandsseitigen Zerstreuungskreises ZK_{an} über eine Tangensfunktion berechnet wird (vgl. Formel 12 und Abbildung 59).

In Formel 14 werden nun die Werte des optischen Systems der Detektoreinheit eingegeben, die in Kapitel 5.2.2.1 ermittelt wurden:

$$a_0 = |l+r| = 187 \text{ mm}, A = 50 \text{ mm}/4 = 12,5 \text{ mm}, a_n = a_0 \pm \Delta a, \Delta a = +1000 \mu\text{m} \dots -1000 \mu\text{m}, f' = 103 \text{ mm}.$$

Außerdem wird darauf verzichtet, den Betrag von $(a_0 - a_n)$ zu erzeugen, um das „Kreuzen“ der gezeigten Strahlen darzustellen und negative Werte zu erhalten. Daraus ergibt sich der Funktionsverlauf, der in Abbildung 63 mit den Mittelwerten der Targets verglichen wird.

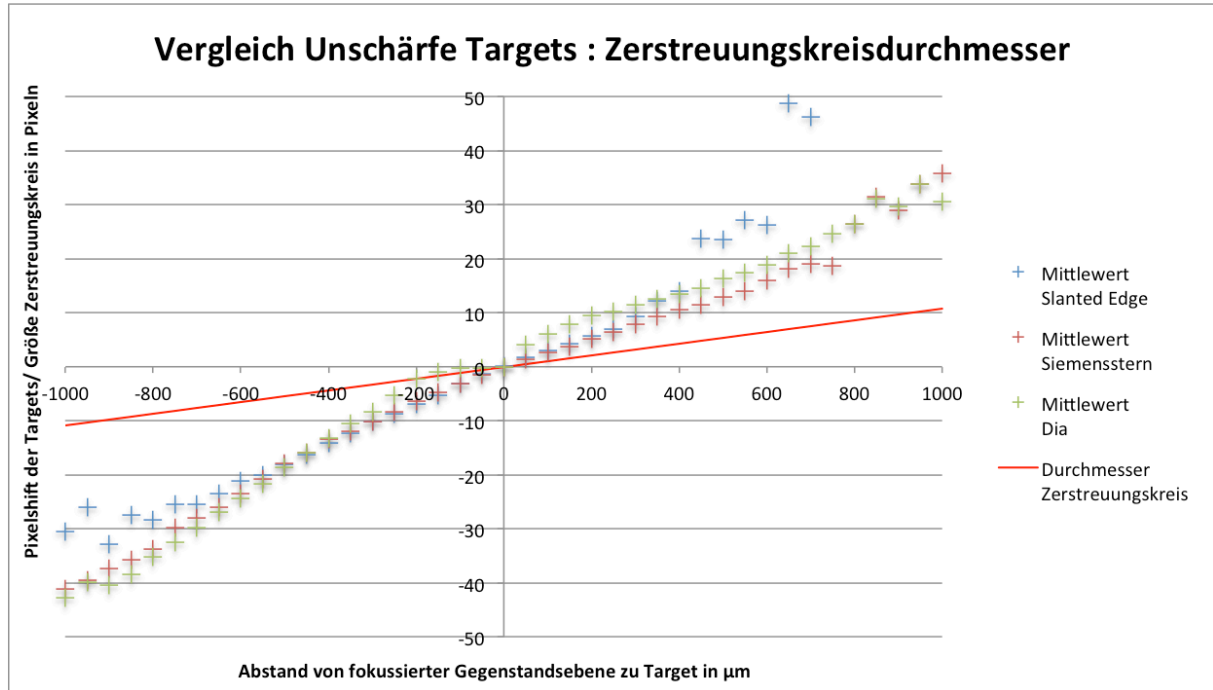


Abbildung 63 | Vergleich der Unschärfe der *Targets* mit dem berechneten Zerstreuungskreisdurchmesser.

Für diese Darstellung wurde die Größe des berechneten Zerstreuungskreises über die Kantenlänge der Pixel der Kamera von $2,2 \mu\text{m}$ in Pixel umgerechnet, um zu den bereits vorhandenen Werten zu passen. Es ist zu erkennen, dass die Funktion für den ausgewählten Bereich keine gute Anpassung liefert. Zwar liegen die berechneten Werte in der selben Größenordnung wie die experimentell gewonnenen, doch zeigt die Funktion einen viel flacheren Anstieg. Dieser ist zusätzlich fast linear in dem gezeigten Bereich und korrespondiert deshalb nicht mit den nichtlinear verlaufenden Werten der Experimente.

5.2.2.3 Ermittlung des Zerstreuungskreises über die Newton'sche Abbildungsgleichung

Ein zweiter Ansatz zur Berechnung der Größe des bildseitigen Zerstreuungskreises ist die Newton'sche Form des Abbildungsmaßstabes

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-z} \quad (15)$$

mit $z = a_0 + f \pm \Delta a$ ($\Delta a = +1000 \mu\text{m} \dots -1000 \mu\text{m}$), $y' = zk_{a'n}$ und $y = ZK_{an}$.

Setzt man in Formel 15 die entsprechenden Werte aus den vorherigen Abschnitten ein, ergibt sich für $zk_{a'n}$ der Funktionsverlauf aus Abbildung 64:

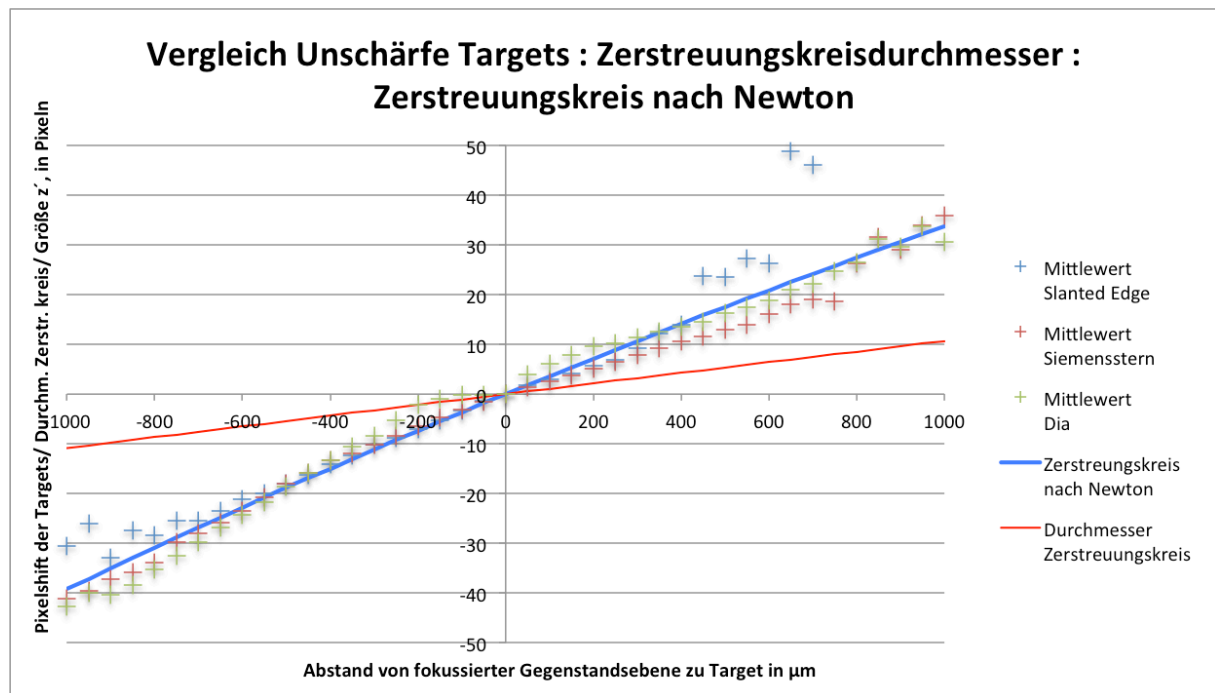


Abbildung 64 | Vergleich der Unschärfe der *Targets* mit dem Durchmesser des Zerstreuungskreises aus **Abbildung 63** und dem Zerstreuungskreisdurchmesser nach der Newton'schen Abbildungsgleichung.

Beim Vergleich der Übereinstimmung dieser theoretisch berechneten Funktion mit der vorherigen aus Kapitel 5.2.2.2 und den Mittelwerten der *Targets*, ist eine deutlich bessere Anpassung zu erkennen. Die Werte, sowie der nicht lineare Verlauf der Funktion zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den experimentell gewonnenen Daten.

Somit ist der Ansatz, den Versatz der Bilder der beiden Kameras zueinander über die Größe des Zerstreuungskreises mit Hilfe des Newton'schen Abbildungsmaßstabes zu berechnen - zumindest im hier dargestellten Bereich - der genauere. Es ist zu bemerken, dass die

Werte zur Bestimmung des Systems nur angenähert sind, insbesondere ist das *Fujinon*-Objektiv als dünne Linse approximiert. Außerdem kann es beim Laboraufbau zu Ungenauigkeiten in der Justierung gekommen sein, was sich negativ auf die experimentell ermittelten Werte auswirkt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass bei einem von Grund auf neu entworfenem System, bei dem sämtliche Parameter bekannt sind und dessen Aufbau unter größter Sorgfalt geschieht eine noch genauere analytische Simulation des Kurvenverlaufes möglich ist.

5.3 Diskussion der Versuchsergebnisse der De- und Refokussierung

In diesem Abschnitt werden verschiedenen Aspekte der in Kapitel 4.2 durchgeführten Experimente diskutiert.

5.3.1 Abweichung der Refokusposition von der Idealposition

Die Ergebnisse in Kapitel 4.2 zeigen nach der Refokussierung stets eine leichte Abweichung von der idealen Position auf.

Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die entsprechende Ausgleichsgerade aus Mittelwerten gewonnen wurde und es bei der Detektion der Defokusposition zu Abweichungen kommt, die mit einer solchen nicht ausgeglichen werden können. Andererseits ist die Detektion der In-Fokus-Position ebenfalls mit einer Unsicherheit behaftet, wie die Kurven der AG zeigen. Somit kann es sein, dass korrekt refokussiert wurde, aber die abschließende Bestimmung dieser Position fehlerhaft ist.

Im Folgenden soll gezeigt werden, dass dies nicht nur ein Problem dieses Aufbaus ist, sondern auch bei ausgereiften Systemen diverser Kameraherstellern der Fall ist:

Die Firma *FoCal* (*focus calibration*) hat sich auf das automatisierte Kalibrieren von Spiegelreflexkameras (SLRs, engl: *single lens reflex camera*) spezialisiert. Sie führte einen Test mit verschiedenen SLRs von Nikon und Canon durch und kam zu dem Ergebnis, dass sowohl bei der Kontrastermittlung (CD), als auch dem Phasenvergleichsverfahren (PD) systemspezifische Abweichungen bei der Detektion der Position auftreten³⁷. In Abbildung 65 ist beispielhaft eines der Auswertdiagramme gezeigt, das diesen Sachverhalt verdeutlicht. Der Versuchsablauf war zweigeteilt: Einerseits wurden Refokussierungen aus der Unendlich-Einstellung (Bezeichnung: *PD/CD Far*), andererseits Defokusmessungen von der In-Fokusposition (*PD/CD None*) getätigt, in beiden Fällen mit zehn Wiederholungen.

Die Messungen wurden nach zwei Kriterien ausgewertet (eine ausführliche Versuchsbeschreibung kann der Website von *FoCal*³⁷ entommen werden):

- *Focus Error*: Die blauen Balken zeigen den Durchschnittswert der Defokussierung nach der Refokussierung. Sehr kleine Werte repräsentieren hierbei eine geringe Bandbreite und sind folglich gut. Von *FoCal* wurden Werte $< 0,1$ als gut angegeben.
- *CoF Drop* (engl. *consistency of focus* – Beständigkeit der Refokussierung): Der Durchschnitt aller refokussierten Aufnahmen wurde mit der am besten refokussierten verglichen (Angabe in %), sodass ein Ergebnis nahe 100 % als sehr gut zu betrachten ist. Für die Darstellung im selben Diagramm wie die *Focus Error*-Werte wurde das Testergebnis vom Ideal (= 100 %) abgezogen und durch 100 geteilt, sodass sehr kleine Werte eine gute Beständigkeit in der Refokussierung (rote Balken) zeigen. Namentlich werden Werte unter 0,05 % als sehr gut betrachtet, da sie nur eine sehr geringe Abweichung zeigen.

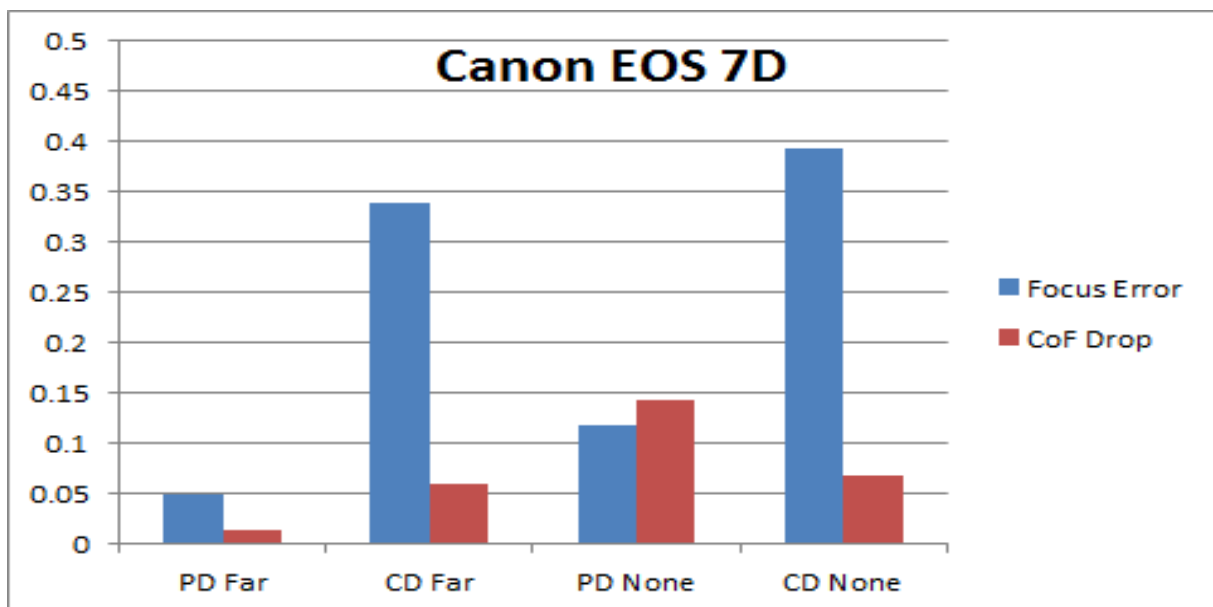


Abbildung 65 | Vergleich verschiedener Refokussierungsmethoden. *Focus Error* gibt die durchschnittliche Bandbreite der Defokussierung an, *CoF Drop* die Abweichung (Abbildung von www.reikan.co.uk³⁷).

Es ist zu erkennen, dass es nicht nur bei der Refokussierung aus der Unendlich-Einstellung der Kamera (*PD/CD Far*), sondern auch bei der Bestimmung der In-Fokusposition (*PD/CD None*) zu Abweichungen kommt. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen dieser Arbeit und scheint somit ein systemeigener Fehler zu sein.

5.3.2 Unterschiede zwischen den verschiedenen *Targets*

Eine weitere Auffälligkeit aller Versuche in Kapitel 4.2 ist, dass es beim Dia zu viel stärkeren Abweichungen kommt als beim Siemensstern, nicht nur bei den Standardabweichungen, sondern auch schon bei der Detektion der Defokussierung. Dies ist ein unerwartetes Ergebnis,

da bei der Erstellung der Ausgleichsgeraden beide *Targets* ein ähnliches Verhalten zeigten, die Standardabweichung des Dias sogar unter der des Siemenssterns lag (vgl. Abbildungen in Kapitel 4.1.3 (.1)). Ein Erklärungsansatz für dieses Verhalten ist, dass das Dia sich während der Versuche verzogen hat. Im Gegensatz zu den anderen *Targets*, welche aus Glas bestehen und bei denen das Motiv aufgedampft ist, besteht das Dia aus Filmmaterial und wird nur mit Klebefilm an einem *Target*-Halter befestigt. Durch Veränderungen des Raumklimas, z. B. der Luftfeuchtigkeit, kann es zu einer Wölbung des Dias gekommen sein, wodurch die transmittierende Wellenfront deformiert wurde. Dies führt zu dem Schluss, dass diese Art von *Target* nicht geeignet für diese Versuche ist. Um trotzdem eine „reale“ Szene als Motiv nutzen zu können, müsste ein stabileres *Target* aus Glas hergestellt werden.

5.3.3 Siemensstern als *Target*

Beim Siemensstern hingegen ist bei sämtlichen Versuchen durchgängig eine geringe Abweichung von der idealen In-Fokusposition vorhanden. Das zeigt einerseits, dass das *Target* trotz der unter 5.1 diskutierten Problematik gut geeignet für diese Versuche ist. Andererseits ist dies auch der Nachweis, dass das gebaute Refokussierungssystem funktioniert.

5.4 Fazit

Im ersten Teil dieses Kapitels wird die Fehleranfälligkeit des Kreuzkorrelationsalgorithmus bezüglich stochastisch verteilter feiner Muster aufgezeigt. Hierbei kommt es zu einer großen Streuung der Messwerte, weil aufgrund der Ähnlichkeit verschiedener Bereiche der Bilderpaare keine eindeutige Zuordnung mit dem Algorithmus möglich ist.

Im zweiten Teil wird auf verschiedene Weise versucht die experimentell ermittelten Werte zu simulieren. Es zeigt sich, dass die Simulation mit *Zemax* nur eine unzureichende Annäherung ermöglicht. Die Berechnung des bildseitigen Zerstreuungskreises über die Newton'sche Abbildungsgleichung zeigt die beste Übereinstimmung.

Im dritten Teil wird gezeigt, dass eine fehlerhafte Detektion der Position ein grundsätzliches Problem ist, es tritt auch bei ausgereiften Systemen verschiedener Hersteller von Spiegelreflexkameras auf. Anschließend werden die Unterschiede der verschiedenen *Targets* diskutiert, mit dem Ergebnis, dass ein Glas-*Target* am besten geeignet ist, da es unempfindlich gegen Umwelteinflüsse im Labor ist.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein opto-mechanisches System zur automatischen Messung einer Defokussierung und anschließender Refokussierung aufgebaut. Die Detektion der Defokussierung erfolgt über die Phasenvergleichsmethode; hierfür wird der vom Objekt kommende Strahlengang parallelisiert, einer gleichmäßigen Feldteilung mittels eines Prismenspiegels unterzogen und von zwei gleichen Sensoren aufgenommen. Die Bilder auf den Sensoren sind prinzipiell ähnlich, weisen bei Defokussierung allerdings eine Verschiebung zueinander auf, die von Richtung und Stärke der Defokussierung abhängig ist. Diese Verschiebung wird per Kreuzkorrelation der beiden Sensorbilder bestimmt. Aus ihrem Betrag kann die Strecke, aus ihrem Vorzeichen die Richtung der nötigen Refokussierung berechnet werden.

Nach der Planungs- und Aufbauphase sind drei verschiedene Experimentreihen mit verschiedenen Objekten (*Targets*) durchgeführt worden:

- Bestimmung des Verhältnis zwischen Gegenstandsweitenänderung und dem Versatz der Bilder zueinander.
- Äquidistante Defokussierung der *Targets* mit Hilfe eines Kollimators und Refokussierung der Detektoreinheit mittels Manipulator.
- Defokussierung in verschiedene Richtungen und um unterschiedliche Strecken und Refokussierung der Detektoreinheit mittels Manipulator.

Aufgrund dieser Versuche konnte der grundsätzliche Funktionsnachweis des Systems erbracht und systeminterne Grenzen aufgezeigt werden.

Diese Grenzen betreffen die *Targets* und den Kollimator und können durch einen veränderten Versuchsaufbau behoben werden. Sie lassen jedoch die Schwachstelle der kreuzkorrelationsgestützten Phasenvergleichsmethode bezüglich stochastisch verteilter Muster erkennen. Hierbei zeigt der Algorithmus starke Schwankungen bei der Bestimmung der Entfernung. Um dies zu beheben sind weitergehende Untersuchungen notwendig, die Kreuzkorrelation muss eventuell durch zusätzliche Analysemethoden ergänzt werden.

7 Ausblick

Da das grundlegende System funktioniert kann nun mit dem Aufbau von Versuchen begonnen werden, die weiter ins Detail gehen:

- Da in den Experimenten dieser Arbeit nur 2D-Objekte verwendet werden, ist es in einem nächsten Schritt nötig Versuche in einer 3D-Umgebung zu gestalten, um zu prüfen, ob die Technik auch dort eingesetzt werden kann. Dafür muss eine angepasste Sensor- und Strahlführungsarchitektur konzipiert werden, um den Anforderungen an verschiedene Gegenstandsweiten innerhalb einer Szene gerecht zu werden.
- Es soll versucht werden, den Aufbau des System kompakter zu gestalten, um einem flugtauglichen Modell näher zu kommen. Hierfür müssen nicht nur die Optikkomponenten, sondern auch der Mechanismus zur Bewegung der Detektorebene angepasst werden.

Abkürzungsverzeichnis

a, a'	Gegenstandsweite, Bildweite
AF	Autofokus
ARMES	engl: <i>autonomous refocus mechanical system</i> – automatisches mechanisches Refokussierungssystem
BE	Bildebene
CCD, CMOS	lichtempfindliche Sensoren
CCF	engl: <i>cross correlation function</i> – Kreuzkorrelationsfunktion
CD	engl: <i>contrast detection</i> – Kontrastdetektion
δ	Änderung Bildweite
D	Durchmesser
EA	elektronische Auswerteinheit
f, f'	Brennweite (gegenstandsseitig, bildseitig)
F, F'	Brennpunkt (gegenstandsseitig, bildseitig)
f#	Blendenzahl
GE	Gegenstandsebene
Ges	Gesamtsystem
GSD	engl: <i>ground sampling distance</i> – Bodenauflösung
h	Höhe
H _n	Hauptpunkt
HF	Hauptfunktion
KEP	konstruktiver Entwicklungsprozess
l	Radius einer spärischen Welle
λ	Wellenlänge
MTO	Maksutov Teleobjektiv
Man	Manipulator
n	Brechzahl
NCCF	engl: <i>normalized cross correlation function</i> – normalisierte Kreuzkorrelationsfunktion
O/T	Objektive/ Teleskope
OPD	engl: <i>optical path difference</i> – optischer Weglängenunterschied
Opt	Optikeinheit
PD	engl: <i>phase detection</i> – Phasendetektion
PD-AF	engl: <i>phase detection auto focus</i> – Phasendetektionsautofokus
PP	engl: <i>principle plane</i> , Hauptebene
r	Radius
r	Abstand von Eingangsebene zu gegenstandsseitiger Hauptebene
s	Abstand von Ausgangsebene zu bildseitiger Hauptebene
S	Satellit
SLR	engl: <i>single lens reflex (camera)</i> – Spiegelreflexkamera
StAbw	Standardabweichung
τ	Verschiebung um bestimmte Zeit
TF	Teilfunktion
u	Verschiebung um bestimmte Strecke
U, u	Öffnungswinkel (bildseitig, gegenstandsseitig)
UF	Unterfunktion
v	Verschiebung um bestimmte Strecke
VIS	sichtbarer Teil des elektromagnetischen Spektrums
ZK, zk	Zerstreuungskreis (gegenstandsseitig, bildseitig)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Eine der ersten Aufnahmen der Erde aus dem Weltraum ² .	1
Abbildung 2 Schematische Darstellung der Änderung der Gegenstandsweite bei Ausschwenken des Satelliten.	4
Abbildung 3 Grafische Darstellung der Änderung der Gegenstandsweite bei Ausschwenken des Satelliten von 0° ... 40° bei den beiden geplanten Flughöhen.	5
Abbildung 4 Schematische Darstellung zur Berechnung der <i>Verschiebung des Brennpunktes</i> δ in Abhängigkeit des OPD zwischen realer und Referenzwellenfront. Mit n = Brechzahl opt. System, OPD = Abstand der beiden Wellenfronten in Höhe Y (Randstrahlen), l = Radius sphärische Wellenfront. (Abbildung aus Smith ⁹).	6
Abbildung 5 Grafische Darstellung der relativen Änderung der Bildweite bei Ausschwenken des Satelliten. Die gestrichelten Linien verdeutlichen die Grenzen der Schärfentiefe bei verschiedenen (λ/x) -Kriterien.	7
Abbildung 6 Schematische Darstellung der Kontrastermittlungsfunktion zur Bestimmung der Schärfe eines Motivs. Der Kontrast ist am größten, wenn die Linsen sich in einer Position befinden, in der das Motiv scharf auf der Bildebene abgebildet wird [b]]. Um diese Position zu bestimmen, muss das Linsensystem die Position mindestens einmal (aber i.d.R. öfter) überfahren um den Kontrastabfall/ -anstieg und den Punkt des relativ höchsten Kontrastes eindeutig bestimmen zu können (Abbildung aus Willet ¹³).	8
Abbildung 7 Schematische Darstellung des Phasendifferenzautofokus (PD-AF). Die relative Position der beiden Teilbilder (s. kleines Diagramm „detektierte Phasendifferenz“) ist abhängig davon, ob das Motiv über-, oder unterfokussiert ist. Aus der Positionierung der beiden Teilbilder zueinander ist ersichtlich, in welche Richtung eine Linsenbewegung erfolgen muss, um zu refokussieren. Aus dem Abstand der beiden Teilbilder kann ermittelt werden, wie weit das Linsensystem bewegt werden muss, da sich der Abstand vergrößert, je stärker die Gegenstandsebene defokussiert ist (Abbildung aus Willet ¹²).	9
Abbildung 8 Schematische Darstellung des Phasenvergleichs der beiden Teilbilder. Im oberen Bild ist zwar das gleiche Muster wie im unteren zu sehen, dieses überlagert sich allerdings nicht; das Motiv ist defokussiert. Aus Richtung und Stärke der Verschiebung der beiden Bilder zueinander kann die nötige Linsenbewegung zur Refokussierung berechnet werden (Abbildung aus Puchner ¹⁵).	10
Abbildung 9 Schematische Darstellung zweier verschobener Bilder	11
Abbildung 10 Prinzipieller Aufbau der Phasendetektionseinheit in Spiegelreflexkameras ²² .	12
Abbildung 11 Fortschrittlicher PD-AF-Sensor (<i>Canon MARK III AF</i>), wie er in der <i>Canon EOS 5D</i> verwendet wird. Es sind deutlich die unterschiedlichen Ausrichtungen der speziellen Detektoreinheiten für horizontale, vertikale und diagonale Messungen zu erkennen ²⁷ .	13
Abbildung 12 Anordnung der italienischen ARMES-Variante. a) verstellbares <i>Target</i> [z. B. Dia, Siemensstern] und Hinterleuchtung; b) Teleskop [MTO] bildet <i>Target</i> nach unendlich ab; c) Teleskop [MTO, baugleich mit b)] fokussiert eingehende Strahlen auf Detektorebene [vgl. Abbildung 13 d)]; d) eigentlicher Aufbau zur Bildaufnahme und Detektion der Defokussierung und zum Refokussieren.	15
Abbildung 13 Aufbau der Detektorebene des italienischen ARMES-Entwurfs. a) Sensorebenen zur Detektion der Phasenverschiebung; b) Fokussieroptiken; c) prismatischer Spiegel zur Feldteilung d) Optik zur Erzeugung eines parallelen Strahlenganges; e) Umlenkspiegel, der einen Teil des Feldes abgreift und auf die Defokusdetektorebene umlenkt; f) eigentlicher bildaufnehmender Sensor.	17
Abbildung 14 Darstellung der Lage des Koordinatensystem auf dem <i>Gimbal</i> , der als Arbeitsplattform dient. Im Hintergrund ist der Linsenkollimator zu erkennen.	19
Abbildung 15 Veränderter Strahlengang, Draufsicht. Sämtliche Linsen/ Objektive/ etc. sind Paraxiallinsen.	20
Abbildung 16 Schematische Darstellung der vorhandenen Aufbauten im Optiklabor.	27
Abbildung 17 Grafische Darstellung der Hauptfunktion 1 und der abgeleiteten Teil- und Unterfunktionen (TF, UF).	28
Abbildung 18 Grafische Darstellung der Hauptfunktion 2 und der abgeleiteten Teil- und Unterfunktionen (TF, UF).	29
Abbildung 19 Aufbau der Detektoreinheit. Zu erkennen sind: a) Vollbildkamera, b _{1,2}) Kameras zur Detektion der Phasenverschiebung, c) Halterung für Prismenspiegel, d) Halterung für Strahlteilerwürfel, e) Einzellinse.	30

Abbildung 20	Grafische Darstellung der Hauptfunktion 3 und der abgeleiteten Teil- und Unterfunktionen.	31
Abbildung 21	Halterung für Objektive und Teleskope. Über die schwarzen Gewindeschrauben können verschiedene Teleskope und Objektive unabhängig vom Durchmesser auf der optische Achse positioniert werden.	34
Abbildung 22	Aufbau des Gesamtsystems. Rechts unten ist der Manipulator (Hexapod) zu sehen.	35
Abbildung 23	Regelkreis zur Darstellung der Funktion der Elektronikkomponenten.	36
Abbildung 24	Aufschlüsselung aller benötigten Komponenten zur elektronischen Auswertung und Ansteuerung.	37
Abbildung 25	Schematischer Ablauf der Versuche. a) Ausgangssituation: Die Gegenstandsebene des ARMES ist gleich der Bildebene des Kollimator–Doctarlux–Aufbaus. Das System ist fokussiert. b) Bewegung der Detektoreinheit.	38
Abbildung 26	Abbildungen der drei <i>Targets</i> . a) <i>Slanted Edge</i> , b) Siemensstern, c) Dia. Der Kontrast der Abbildungen wurde für die hiesige Darstellung optimiert, um die Erkennbarkeit zu fördern. Für die Auswertung der Experimente wurden keinerlei Bildoptimierungen durchgeführt.	40
Abbildung 27	Drei Darstellungen der Abhängigkeit des <i>Pixelshifts</i> von der Bewegung und der Bewegungsrichtung des Manipulators.	41
Abbildung 28	Drei Detailvergrößerung der Abbildungen 27 zur besseren Erkennbarkeit.	43
Abbildung 29	Mittelwerte und Standardabweichungen der kombinierten Werte aus beiden Bewegungsrichtungen des Manipulators.	45
Abbildung 30	Vergleich der Standardabweichungen aller drei <i>Targets</i>	46
Abbildung 31	Detailvergrößerung der Abbildung 30 zur besseren Erkennbarkeit.	46
Abbildung 32	Darstellung der Mittelwerte der drei verschiedenen <i>Targets</i>	47
Abbildung 33	Detailvergrößerung der Abbildung 32 zur besseren Erkennbarkeit.	48
Abbildung 34	Einteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Siemenssterns.	49
Abbildung 35	Einteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Dias.	49
Abbildung 36	Zweiteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Siemenssterns.	50
Abbildung 37	Erster Ansatz für eine zweiteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Dias.	51
Abbildung 38	Zweiter Ansatz für eine zweiteilige Ausgleichsgerade für die Messwerte des Dias.	51
Abbildung 39	Schematischer Ablauf der ersten Versuchsreihe. a) Ausgangsposition, das System ist im Fokus. b) Es erfolgt eine Defokussierung per Kollimator um einen bestimmten Betrag, diese wird von der Ausgangsposition vom ARMES detektiert und daraufhin refokussiert. c) Nachdem das ARMES in die Ausgangsposition zurückgekehrt ist, wiederholt sich der Ablauf [b)].	53
Abbildung 40	Begriffsdefinition: a) normal fokussiert, b) unterfokussiert, c) überfokussiert.	53
Abbildung 41	Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in <i>positive</i> Richtung auf der optischen Achse.	54
Abbildung 42	Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in <i>negative</i> Richtung auf der optischen Achse.	54
Abbildung 43	Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in <i>positive</i> Richtung auf der optischen Achse.	55
Abbildung 44	Defokussierung durch Verstellung des Kollimators in <i>negative</i> Richtung auf der optischen Achse.	55
Abbildung 45	Darstellung der Standardabweichungen bei der jeweiligen Position vor und nach der jeweiligen Refokussierung für den Siemensstern.	56
Abbildung 46	Darstellung der Standardabweichungen bei der jeweiligen Position vor und nach der entsprechenden Refokussierung für das Dia. Weil sich in den Versuchen <i>Ausgleichsgerade</i> (Kapitel 4.1.5ff) herausstellte, dass sich die ersten Positionen der Überfokussierung besser mit der Geraden für die Unterfokussierung approximieren lassen, sind für diese Werte beide Standardabweichungen angegeben.	57
Abbildung 47	Schematisch Darstellung der zweiten Versuchsreihe. Von der Ausgangsposition a) wird per Kollimator defokussiert [b)]. Diese Defokussierung wird detektiert und das ARMES refokussiert entsprechend. Von dieser Position ausgehend beginnt der Regelkreis aus De- und Refokussierung erneut [c)].	58
Abbildung 48	De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.	59
Abbildung 49	De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.	59
Abbildung 50	De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.	60
Abbildung 51	De- und Refokussierung von der jeweils vorherigen refokussierten Position aus.	60
Abbildung 52	Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.	61
Abbildung 53	Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.	61
Abbildung 54	Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.	62

Abbildung 55	Standardabweichung für die Versuche mit der relativen De- und Refokussierung.	62
Abbildung 56	Schematische Darstellung der Problematik die zur erhöhten Standardabweichung bei der <i>Slanted Edge</i> führt. M = Milchglasscheibe, T = <i>Target</i>	64
Abbildung 57	a) <i>Slanted Edge</i> nahe des Fokuspunktes des Kollimator-Doctarlux-Systems. Das <i>Target</i> ist nahezu homogen ausgeleuchtet. b) Bei ausreichend starker Defokussierung wird die streuende Milchglasscheibe durch das <i>Slanted Edge Target</i> sichtbar. c) Abbildung der Streuglasscheibe ohne <i>Target</i> davor. Deutlich ist die Strukturierung erkennbar. (Der Kontrast dieser Aufnahmen wurden der besseren Erkennbarkeit wegen optimiert.)	65
Abbildung 58	Vergleich realer <i>Targets</i> zu simuliertem Siemensstern.	67
Abbildung 59	Schematische Darstellung des Strahlenganges bei Defokussierung und Bezeichnung der Teilstrecken im optischen System.	68
Abbildung 60	Kardinalpunkte und nötige Streckenangaben zur Berechnung eines optischen Systems mittels der Matrixmethode. Abbildung aus Pedrotti ³⁶	69
Abbildung 61	Nicht maßstabsgetreue Darstellung zur Lage einiger Ebenen und Strecken im Gesamtsystem. Die Bezeichnungen korrespondieren mit den im Text angegebenen und den in Abbildung 59 und Abbildung 60 gezeigten. Außer: l = Abstand Linse – GE = 80 mm.	71
Abbildung 62	Prinzipieller Verlauf der Größenänderung des Zerstreuungskreises bei Defokussierung.	72
Abbildung 63	Vergleich der Unschärfe der <i>Targets</i> mit dem berechneten Zerstreuungskreisdurchmesser.	73
Abbildung 64	Vergleich der Unschärfe der <i>Targets</i> mit dem Durchmesser des Zerstreuungskreises aus Abbildung 63 und dem Zerstreuungskreisdurchmesser nach der Newton'schen Abbildungsgleichung.	74
Abbildung 65	Vergleich verschiedener Refokussierungsmethoden. <i>Focus Error</i> gibt die durchschnittliche Bandbreite der Defokussierung an, <i>CoF Drop</i> die Abweichung (Abbildung von www.reikan.co.uk ³⁷).	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Spezifikationen des optischen Systems für <i>GeoEye-2</i>	3
Tabelle 2 Anforderungsliste zum Projekt „Aufbau und Integration eines automatischen Refokussierungsmechanismus in einen vorhandenen Laboraufbau“, Abschnitt <i>Funktion</i>	23
Tabelle 3 Anforderungsliste, Abschnitt <i>Geometrie</i>	25
Tabelle 4 Anforderungsliste, Abschnitt <i>Kinematik</i>	26
Tabelle 5 Morphologisch Analyse der Einheit zur Halterung verschiedener Objektive und Teleskope. Die fettgedruckten Lösungsmöglichkeiten haben die höchste Punktzahl erhalten und sind die endgültigen Lösungen.	33

Literaturverzeichnis

1. National Geographic – History of Satellites.
http://www.nationalgeographic.com/eye/sat/satel_2.html
(zuletzt besucht: 10. März 2014)
2. Reichhardt, T. The First Photo from Space.
<http://www.airspacemag.com/space-exploration/FEATURE-FirstPhoto.html>
(zuletzt besucht: 10. März 2014)
3. Baumann, P. R. HISTORY OF REMOTE SENSING, SATELLITE IMAGERY, PART II.
http://www.oneonta.edu/faculty/baumanpr/geosat2/RS_History_II/RS-History-Part-2.html
(zuletzt besucht: 10. März 2014)
4. Lockwood, I. ITT Exelis delivers imaging system for next-generation, high-resolution GeoEye-2 satellite. <http://www.exelisinc.com/News/PressReleases/Pages/ITT-Exelis-delivers-imaging-system-for-next-generation-high-resolution.aspx> (zuletzt besucht: 10. März 2014)
5. Meng, X.; Feng, H.; Xu, Z.; Li, Q.; Chen, Y. In *A method of autofocus for remote sensing camera*, SPIE Optical Engineering+ Applications 2010; (International Society for Optics and Photonics: 2010.
6. Müller-Rowold, G. M. Signal- und Bildverarbeitungssystem zur automatischen Refokussierung von opto-elektronischen Sensoren (Bachelorarbeit). Humboldt Universität zu Berlin, 2014.
7. Reulke, R., Persönliche Besprechung. In 2013.
8. Born, M.; Wolf, E., *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge University Press: 1999.
9. Smith, W. J., *Modern Optical Engineering – The Design of Optical Systems*. 3rd ed.
10. Bass, M.; Van Stryland, E. W.; Williams, D. R.; Wolfe, W. L., *Handbook of Optics*. 2 ed.; Optical Society of America: 1995; Vol. 1.
11. Gu, B.-J.; Lee, J.-K. Camera having an automatic focus system (Patent – US 5666566). 1997.
12. Willett, N.; Levoy, M. Autofocus: phase detection.
<http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/autofocusPD.html>
(zuletzt besucht: 07. Jan 2014)
13. Willett, N.; Levoy, M. Autofocus: contrast detection.
<http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/autofocusCD.html>
(zuletzt besucht: 07. Jan 2014)
14. Hirai, I. Autofokuskamera (Patent – DE 4021375 A1). 1991.
15. Puchner, R. Fokussieren.
http://www.puchner.org/Fotografie/technik/die_kamera/fokus.htm
(zuletzt besucht: 07. Jan 2014)
16. Esterl, M. Late to Digital, Leica Slow to Refocus.
<http://online.wsj.com/news/articles/SB122152103387739231>
(zuletzt besucht: 20. Jan. 2014)
17. unbekannt, A. PHOTOKINA 1976: le LEITZ CORREFOT.
<http://frbb.free.fr/Correfot/Correfot.htm>
(zuletzt besucht: 21. Jan. 2014)
18. Stauffer, N. L. Detecting apparatus for determining when image is in focus (Patent – US 3838275). (A) – 1974-09-24, 1974.
19. Stauffer, N. L. Focus detecting apparatus (Patent – US 4002899). 1977.
20. Gruenberg, A., CAMERA; A New Auto-Focusing Single-Lens Reflex. In *The New York Times*, New York, 22. Feb. 1987.
21. Feder, B. J., Honeywell-Minolta Dispute Teaches Conflicting Lessons. In *The New York Times*, New York, 12. Feb. 1992.
22. Sulanto, M. Vaihetarkennus, miten se oikein toimii?
<http://www.sulantoblog.fi/vaihetarkennus-miten-se-oikein-toimii/>
(zuletzt besucht: 22. Jan. 2014)
23. Nikon Predictive Focus Tracking System.
<http://www.nikon.com/about/technology/rd/core/software/caf/index.htm>
(zuletzt besucht: 21. Jan. 2014)
24. Canon EOS 70D: Dual Pixel CMOS AF explained.
http://cpn.canon-europe.com/content/education/technical/eos_70d_technology.do
(zuletzt besucht: 22. Jan. 2014)

25. Canon Technical Report: The Mechanisms behind Fast, Comfortable Autofocus.
<http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/2011/09/-t04>
(21. Jan. 2014)
26. Canon Technical Report: The Mechanisms behind Fast, comfortable Autofocus.
<http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/2011/09/>
(zuletzt besucht: 07. Jan 2014)
27. Canon Infobank – Autofokus (AF).
<http://cpn.canon-europe.com/content/education/infobank/autofocus/autofocus.do>
(zuletzt besucht: 21. Jan. 2014)
28. Shirai, M. Vermessungsinstrument mit automatischer Scharfeinstellung
(Patent – DE 1999121119). D, 2005.
29. Tsuda, K.; Suzuki, S.; Ogawa, R. Vermessungsinstrument mit Autofokuseinrichtung
(Patent – DE 19727988 A1). 1998.
30. Shindo, O.; Hayakawa, M. Fotografische Kamera mit automatischer Scharfeinstellung
(Patent – DE 3919459 C2). 1989.
31. Fuji, P. Photokina 2010 – Alles im Überblick.
http://www.fujifilm.in/Documents/photokina2010/pdf/release/overview_g.pdf
(zuletzt besucht: 21. Jan. 2014)
32. Corporation, F. H. Evolution into the X-Trans CMOS II sensor with phase detection pixels. AF speed achieving the level of single lens reflex cameras.
http://fujifilm-x.com/development_story/en/sensor/
(zuletzt besucht: 07. Jan 2014)
33. Butler, R. Exclusive: Fujifilm's phase detection system explained.
<http://www.dpreview.com/news/2010/8/5/fujifilmpd>
(zuletzt besucht: 21. Jan. 2014)
34. Wartenberger, D., Gerätekonstruktion – Lehrblätter (Vorlesung). In 2012.
35. Ritchey, T., Fritz Zwicky, morphologie and policy analysis. In *16th EURO conference on operational analysis, Brussels*, 1998.
36. Pedrotti, F. L.; Pedrotti, L. S., *Introduction to Optics*. 1993.
37. Meston, R. AF Consistency Comparison: Phase Detect vs Contrast Detect.
<http://www.reikan.co.uk/focalweb/index.php/2012/12/af-consistency-comparison-nikon-canon-phase-detect-contrast-detect/>
(zuletzt besucht: 09. März 2014)

Danksagung

Zuallererst gilt mein Dank Herrn Prof. Ralf Reulke vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für die Betreuung dieser Arbeit und für die Möglichkeit an einem raumfahrtbezogenen Projekt zu arbeiten. Damit ist ein Jugendtraum in Erfüllung gegangen. Dankeschön!

Nicht weniger Dank gilt meinem Hochschulbetreuer Prof. Burkhard Fleck, dafür, dass er mir das SciTec-Rundum-soglos-Paket hat angedeihen lassen und mir den Rücken bezüglich des Verwaltungsaufwandes freihielt, als es am Ende eng wurde. Und natürlich für die Begleitung durch das ganze Studium – ohne ihn wäre die Welt der Optik nicht so bunt gewesen.

Außerdem möchte ich auch Herrn Bischoff danken. Nicht nur während dieser Arbeit, sondern während des gesamten Studiums stand er mit Rat und Tat zur Seite und hatte auf jede Frage – nicht nur aus dem Bereich der Optik – eine allumfassende Antwort.

Ein ganz großes Dankeschön geht auch an meine Kollegen für die gute Zusammenarbeit und den freundschaftlichen Zusammenhalt bei uns im Büro!

Hannes - Danke für die vielen Ideen und Diskussionen rund um die Konstruktion. Ohne einen Praktiker wie Dich, wäre das Projekt nicht so schnell gediehen.

Jan, an dich geht ein zweifaches Danke: einmal für die fachlichen Hintergründe und die Diskussionen von Optik über Physik, bis Informatik – die Liste ist zu lang sie hier aufzuführen. Aber - und ich möchte fast sagen vor allem – Danke für die Gespräche abseits des rein Fachlichen, für gewaltige Wortwitze, patente Ideen und die schonende Einführung in die etymologischen Grundlagen der deutschen Sprache. Und für die Kekse.

Malte, ohne Dich stünden zwar jede Menge Optikkomponenten im Reinraum, aber bewegen würde sich davon nix - danke für deine Programmierkünste und viel Erfolg bei deiner Bachelorarbeit!

Martin, Danke, für deine Ideen und vor allem für dein Organisationstalent. Wann immer ich "mal kurz" eine Frage zu organisatorischen Abläufen hatte, kam von Dir prompt eine hilfreiche Antwort.

UND: Martin und Jan, vielen lieben Dank für das Durchsehen der Arbeit, so ganz kurz vor Schluss. War gute Arbeit. Teilweise.

Sandra, Jakob und Iwo, an euch geht ein ganz großes Dankeschön für das Zurückholen in die Realität, als mein Kopf voller Matrizen war und ich vollkommen verwirrt durch Friedrichshain gestolpert bin.

Meine liebe Schwester, Danke für das Korrekturlesen und Feinschliffverpassen! Was würde ich nur ohne Dich machen, die Du mir die sprachlichen Steine, die ich mir so umständlich in den Weg lege, einfach wieder weg fegst. Wie versprochen, du bekommst ein großes Eis.

Und zum Schluss, aber nicht zuletzt, ein niemals endendes Dankeschön an Dich, Mutti. Was Du geleistet hast kann nicht in Worten wiedergegeben werden, ohne Dich stünde ich heute nicht hier. Danke, dass du immer für mich da bist. Diese Arbeit ist Dir gewidmet.

Erklärung der Selbstständigkeit

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst und keine, außer den bezeichneten Quellen und Hilfsmitteln benutzt habe. Außerdem wurde diese Arbeit weder in gleicher, noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort	Datum	Unterschrift Christian Williges
-----	-------	---------------------------------

